

文章编号 1674-2915(2010)06-0598-07

极紫外光刻系统物镜光学元件的支撑与分析

王 辉

(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: 介绍了极紫外光刻系统物镜光学元件的支撑原理和支撑要求, 分析了符合运动学支撑要求的物镜支撑结构和面形检测用支撑结构; 针对支撑结构性能和支撑方案中关键问题进行了深入研究, 并提出了相应的解决方案。最后建立了支撑结构的有限元模型, 并在此基础上进行了重力场中的镜体变形分析和温度场作用下系统的热变形分析。分析结果表明, 检测用支撑与实际用支撑两种结构在重力环境下支撑出的元件面形基本相同, 面形相差 0.002 6 nm(RMS); 温控范围为 0.05 时, 由机械结构热变形引起的镜体面形变化在 0.001 nm(RMS) 量级。研究表明, 运动学物镜元件支撑结构能够满足极紫外光刻系统对于物镜机械支撑结构的要求。

关键词: 极紫外光刻; 物镜; 运动学支撑; 有限元分析

中图分类号: TN305.7; TH703 文献标识码: A

Objective optical mounts and analysis for EUVL

WANG Hui

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

Abstract: The principle and requirements of the optical mount of an Extreme Ultraviolet Lithography(EUVL) system are introduced, and the mount structures according with the kinematic coupling requirements used in an actual lithographic camera and used in an interferometer are analyzed. The mount performance and key problems in mount precept are studied, and the corresponding solutions are also brought forward. Finally, Finite Element Analysis(FEA) models for optical mounts are built up, and the figure changes in the gravitation field and thermal field are analyzed, respectively. The results indicate that the figures on the mount structures used in the camera and used in the interferometer are the same basically in gravitational field, and the difference of the figure is 0.002 6 nm(RMS) . When the temperature has a change of 0.05 , the figure change of the structure is in the scale of 0.001 nm(RMS) . The results show that the proposed kinematic mount structures can satisfy the mechanical requirements of mounts for EUVL systems.

Key words: Extreme Ultraviolet Lithography(EUVL) ; objective; kinematic mount; Finite Element Analysis (FEA)

1 引言

集成电路制造技术一直按照“摩尔定律”不断向前发展,2010年已进入45 nm技术节点。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]。EUVL技术是193 nm深紫外光刻(DUVL)技术向13.5 nm EUV更短波段的合理延伸,其最大限度地集成了传统光刻技术的发展成果。但是由于工作于波长更短的EUV波段,EUVL对非球面加工、面形检测、极紫外多层膜、物镜系统设计与系统波像差检测等技术提出了严峻的挑战^[2,3]。

EUVL系统必须达到衍射极限分辨率的要求,根据Marechal判据,系统波前偏差应小于 $\lambda/14$,即小于1 nm(RMS),对应于四镜系统,单个反射面面形要求为0.25 nm(RMS),对应于六镜系统则更为严格,单个反射面面形要求为0.20 nm(RMS)^[4]。上述多项关键技术中,物镜支撑结构设计和支撑方案选择与最终能否实现该面形要求直接相关。

国外方面,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^[5,6]。由于起步较晚,我国目前还处于关键技术积累阶段。

在EUVL物镜支撑结构领域,尤其是到了0.20 nm(RMS)面形量级水平,国内的研究工作非常有限,而国外的文献中多数也仅涉及到支撑方案选择以及所能达到的效果,很少涉及到具体的支撑结构性能分析和支撑方案中关键问题的处理。为了满足极紫外光刻系统对物镜机械支撑结构的要求,本文针对于上述两个方面的问题进行了具体的研究,以期能够为极紫外光刻系统物镜光学元件支撑的设计与实现提供一定参考。

2 物镜支撑原理与支撑方案

2.1 实际应用支撑设计

对于物镜系统而言,机械支撑结构极为重要,

它直接决定着投影物镜的光学性能。支撑方法应尽可能少地引入不可预测的面形变化^[7],对于环境变化尤其是温度和振动不能过于敏感^[8],并且光学系统相对于整体坐标系能够实现精确定位。另外,支撑方法还要满足短期和长期的稳定性要求,由于工作在真空环境中,要求系统不能放气,且允许镜体与支撑结构安装与分离。

运动学支撑方案能够很好地满足物镜系统对于支撑结构的苛刻要求^[9]。如图1所示,运动学支撑中镜体采用三点支撑,每点限制轴向和切向2个自由度,系统整体约束6个自由度,实现了精确约束;由于其三切向约束力臂最长且相等,保证了设计的稳定性和平衡性。对于局部单个支撑点来说,理想情况下每点都具有4个自由度,可以实现局部无应力支撑的要求。理想情况下,在约束方向上具有完全的刚性,非约束方向上完全不存在摩擦阻力等因素影响,因此该结构具有完全的重复性。

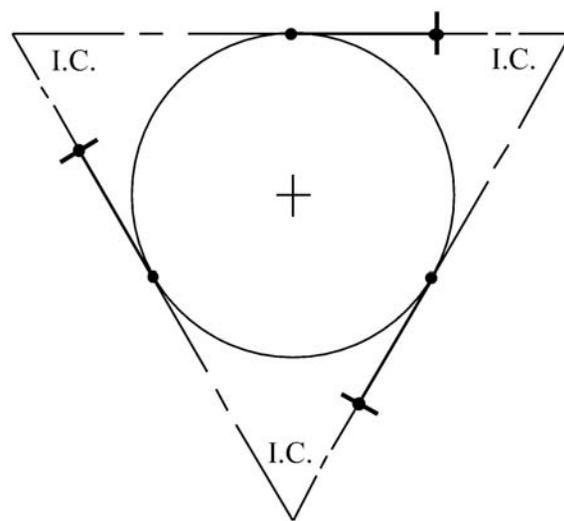


图1 理想运动学支撑示意图

Fig.1 Schematic map of ideal kinematic mount

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,如图2(a)所示的双脚架支撑结构,图2(b)所示的片体支撑结构以及图2(c)所示的组合支撑结构。在实现前述极紫外光刻系统对物镜机械支撑的要求方面,这些结构各具特色^[10,11]。

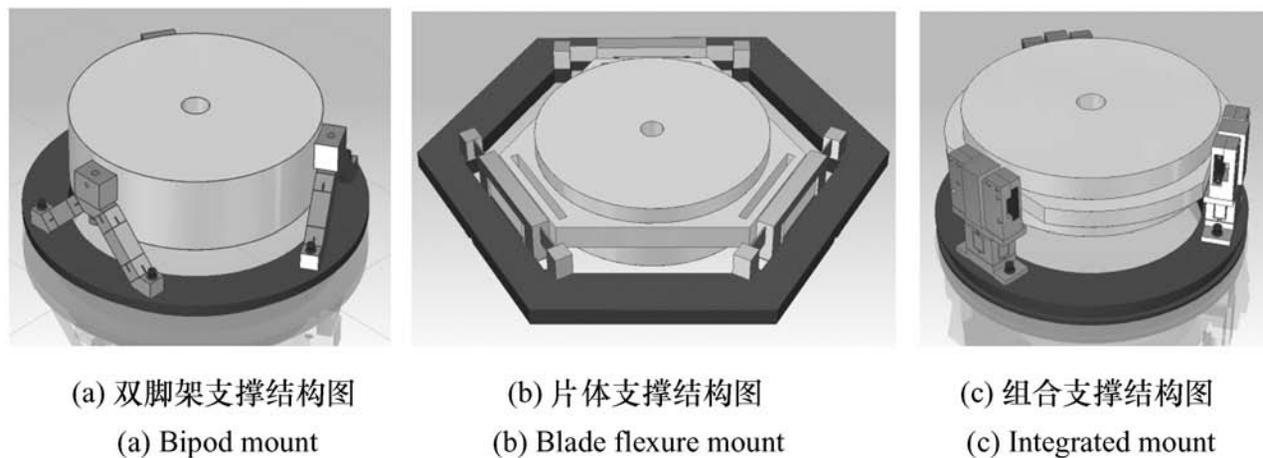


图2 实际运动学支撑结构图

Fig 2 Kinematic mount structures used in lithographic camera

2.2 检测加工支撑设计

极紫外光刻系统对实际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,常用的解决方案是对带实际支撑的光学元件进行原位面形检测,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性成为影响干涉仪检测重复性的一个重要因素,特别是到了 0.25 nm(RMS) 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,需要有特殊设计的检测支撑结构,且特别要保证支撑结构具有高重复性^[12]。

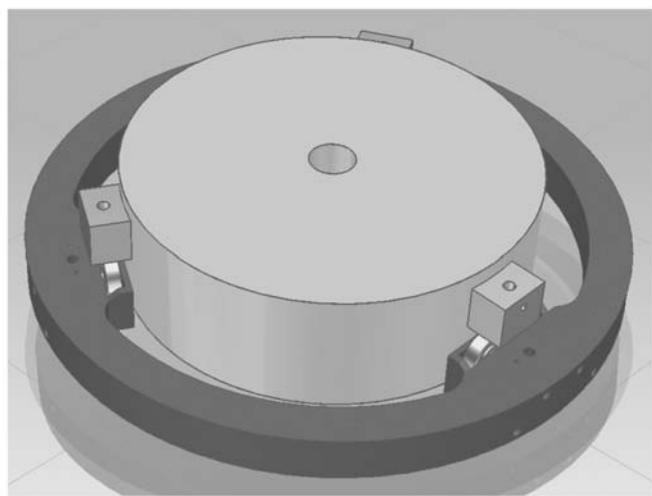


图3 高重复性检测支撑结构图

Fig. 3 High repeatability mount used in optic measurement

如图3所示的高重复性检测支撑,由于采用了高精度滚动轴承运动学支撑结构,检测过程中接触及随机摩擦力将比实际支撑小一个数量级,

使得该结构在检测加工过程中能够实现好于 0.1 nm(RMS) 的面形重复性。

3 支撑方案关键问题对面形的影响

对于物镜系统而言,支撑结构性能和支撑方案实现过程对最终面形实现均有直接影响。因此需要考虑支撑结构设计,同时控制光学元件和支撑结构的装配过程,使影响面形的干扰因素尽量少地引入到系统中,以实现装配后镜面符合 0.25 nm(RMS) 的面形要求,同时能够精确定位面形相对于装配基准的空间位置关系。

3.1 支撑结构定位对面形影响的分析

由于元件加工周期等原因,镜体往往采用支撑凸台和光学元件相粘接的形式,这可能引起接触球位置的不确定性,同时机械和光学元件也有一定的加工公差范围^[13]。这些因素均会对光学元件和支撑结构的装配定位精度产生影响。表1为运用有限元分析方法得到的支撑装置加工装配关键参数对面形影响的灵敏度分析。

由表1可以看出,在支撑结构的加工和装配过程中,接触副位置偏差和片体厚度偏差对最终面形的影响最为严重。考虑到接触副位置偏差可以通过CMM进行在线检测修正,该支撑方案中面形最敏感的部分为片体厚度偏差,因此需要在支撑结构公差分配中予以考虑,同时采用电火花线切割技术实现片体厚度和加工精度。这些措施的实施可确保由于运动学支撑条件改变而引起的面形变化在允许范围内。

表 1 加工装配参数对面形影响的分析及误差分配

Tab. 1 Analysis on effect of parameters on optic figure and error distribution

| 参数 | 灵敏度分析 | | 公差分配 |
|-----------|--------------------|--------------|---------------------|
| | 各项偏差 | 面形变化 /nm rms | |
| 接触副位置偏差 X | 5.13 μm | 0.01 | 5 ~20 μm |
| 接触副位置偏差 Y | 3.77 μm | 0.01 | 3 ~15 μm |
| 基准面倾斜 X | 0.45 mrad | 0.01 | 0.4 ~2 mrad |
| 基准面倾斜 Y | 0.63 mrad | 0.01 | 0.4 ~2 mrad |
| 片体长度 | 151 μm | 0.01 | 100 μm |
| 片体厚度 | 5.71 μm | 0.01 | 5 μm |
| 片体倾斜 | 0.78 mrad | 0.01 | 0.5 mrad |

3.2 接触副残余摩擦力对面形影响的分析

支撑装配方案包含球锥接触过程,该过程产生的摩擦力会导致不可预计的随机面形变化,因此最终面形是不确定的量,不确定范围(重复性)受残余摩擦力影响,同时也受装配方法的影响。有限元仿真分析结果显示,面形应达到 0.25 nm(RMS) 的量级水平,装配过程接触面所产生的干扰扭矩应好于 $1 \times 10^{-3} \text{ N} \cdot \text{m}$ 量级。实现上述苛刻的面形要求必须采取措施减少接触过程中摩擦力对面形的影响。一方面,考虑对接触面做表面处理,通过减小摩擦系数的方法减小残余摩擦力。由于到物镜系统要求在真空环境下工作,接触副不能采用润滑剂,因此采用在接触表面镀二硫化钼的方法使摩擦系数减低 0.1 左右。另一方面,从装配方案的角度来减小摩擦力的影响。传统的装配方案中,镜体直接放置于柔性双脚架之上,两者通过球锥副发生接触。接触过程中伴随有镜体面形变化和支腿状态变化,面形稳定后镜体处于近似运动学约束状态,此时镜体中含有的残余摩擦力等干扰因素对面形的影响可以表示为:

$$X_i = \frac{M_i}{K_{\text{mirror}}} \quad (1)$$

其中, M_i 表示传统装配过程中镜体中所引入的干扰扭矩, K_{mirror} 表示镜体刚度。

对传统装配方案进行优化,镜体安装过程分成两个阶段,第一阶段结合工装措施实现柔性支架刚性化,该支撑形式稳定后处于非运动学约束状态,其面形中含有由于过约束而造成的面形变化,同时也含有残余摩擦力等干扰因素所引起的面形变化,此时残余摩擦力造成的影响与式(1)

基本相同;第二阶段去除工装,支腿恢复各向柔性,上述由于过约束和残余摩擦力而造成的镜体局部应力共同有很大一部分传递至柔性支腿中,此时仍作用于镜体的残余摩擦力与支腿局部刚度相关,如式(2)所示,稳定后镜体处于近似运动学约束状态,残余摩擦力造成的影响变为式(3)的形式。

$$M_{i_2} = K_{\text{leg}} \cdot K_i \quad (2)$$

$$X_2 = \frac{M_{i_2}}{K_{\text{mirror}}} = \frac{K_{\text{leg}}}{K_{\text{mirror}}} \cdot X_1 \quad (3)$$

其中, M_{i_2} 表示优化装配过程中镜体中所引入的干扰扭矩, K_{mirror} 表示镜体刚度, K_{leg} 表示支链刚度。

经过特殊结构设计,支腿各向刚度远小于镜体刚度,显然由式(3)可知优化方案通过将镜体安装分为两个阶段,残余摩擦扭矩对面形的影响进一步减小,使得摩擦力和其他不可控的干扰因素对面形的影响进一步降低。

另外,还可以对装配后的系统整体施加高频微幅振动,使得接触面静摩擦变为滑动摩擦,通过减小摩擦力来减小摩擦对面形的影响。

4 物镜支撑结构性能分析

4.1 建立支撑结构有限元模型

在支撑结构设计和方案分析过程中,随着面形要求达到深亚纳米量级的水平,光学元件中由支撑结构引入的机械应力和细微温度变化引入的热应力均需予以考虑。有限元方法能够对这些细微影响进行有效的量化分析,为支撑结构设计和支撑方案选择提供参考依据,下面针对图 2(a) 所

示支撑结构进行有限元建模与分析。

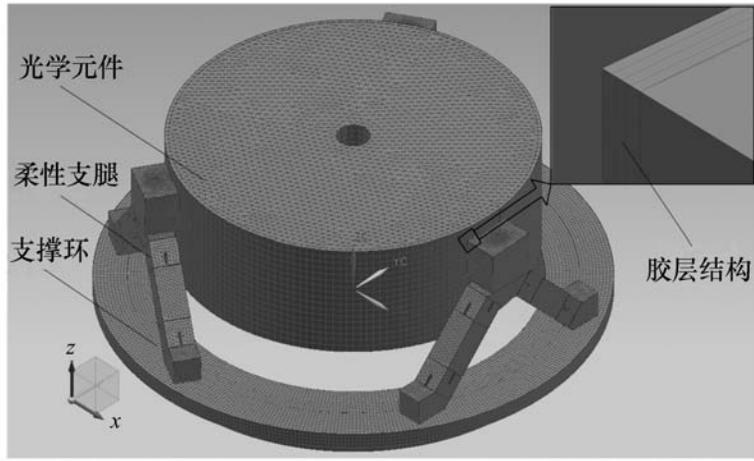


图4 光学元件支撑结构有限元模型

Fig.4 Finite element model for mount of optical element

建模过程中对次要结构进行了理想化构建,模型中相应结构分别赋予了微晶玻璃,超钢钢和环氧树脂3种材料属性,如图4所示,为了更好地模拟环氧树脂的性质,在胶层厚度方向上细划了4层网格,其它支撑结构模型建立过程相似。

4.2 重力场下支撑结构性能分析结果

如前所述,为了消除重力环境对面形的影响,需要特殊设计高重复性检测用支撑结构,其性能的主要评价指标是重力场下与实际支撑结构面形的接近程度。因此,对图2(a)和图3所对应的支撑结构进行分析评估,如图5所示。结果显示两支支撑结构在重力环境下支撑出的元件面形基本相同,面形相差0.0026 nm(RMS),说明忽略摩擦情况下检测支撑与实际支撑均满足运动学支撑条件,符合物镜系统对支撑结构的要求。

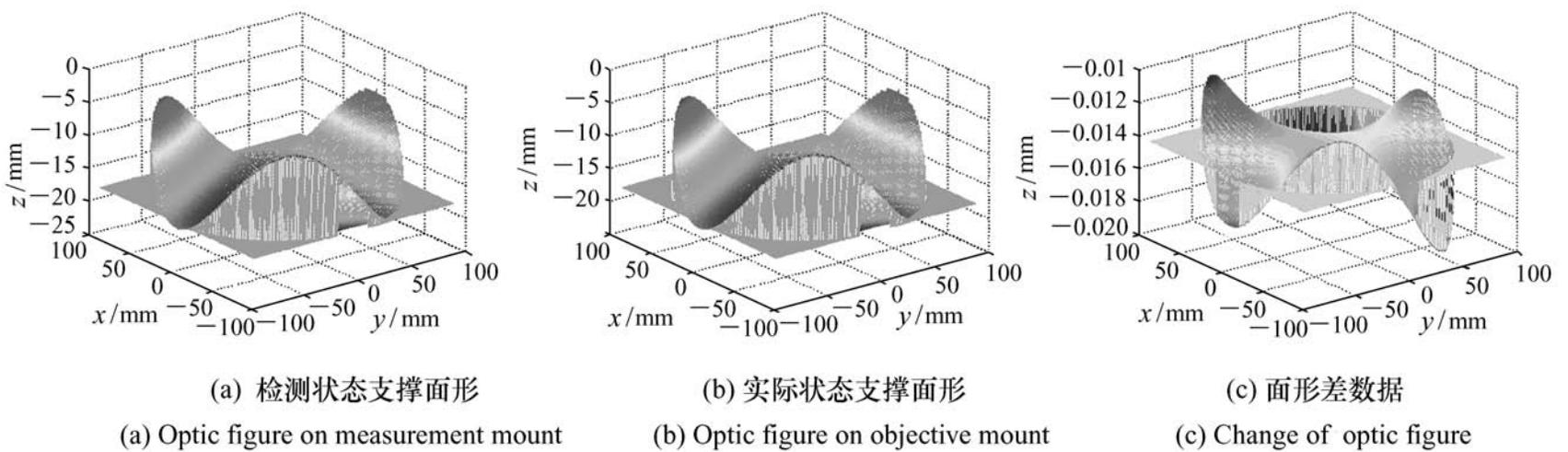


图5 重力场下支撑结构性能分析结果

Fig.5 Performance of mounts in gravitational field

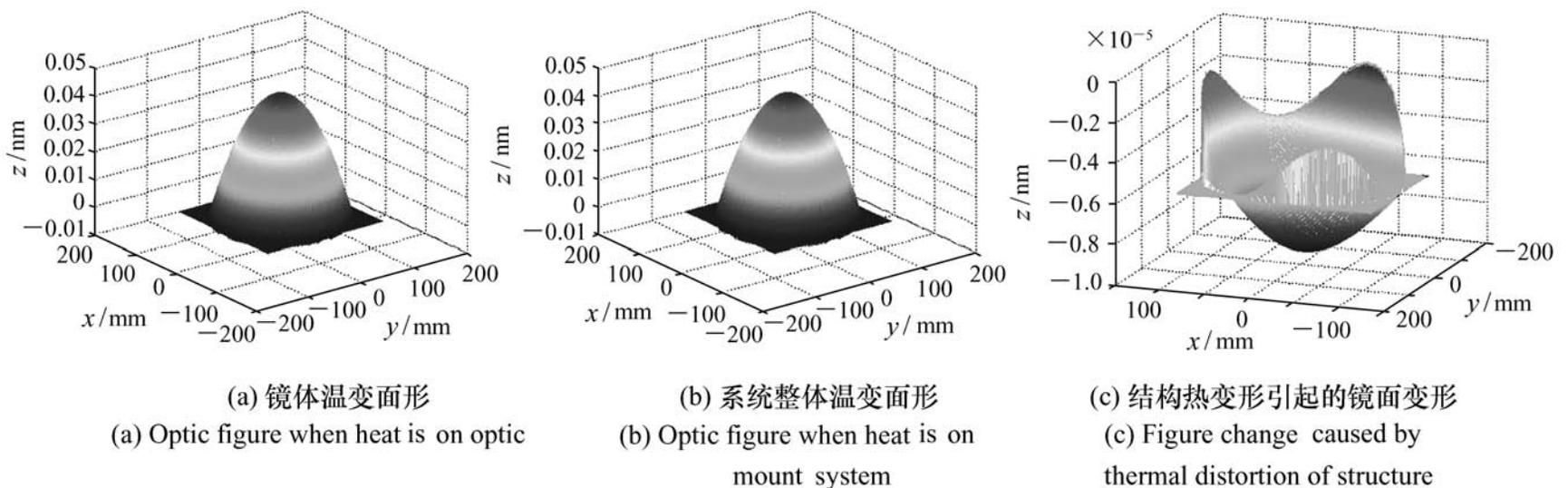


图6 常规温控条件下结构热性能分析结果

Fig.6 Performance of mounts in conventional temperature conditions

4.3 常规温控条件下结构热性能分析结果

为了达到衍射极限分辨率,物镜系统对工作环境尤其是温控环境有着严格的要求。对于物镜系统而言,要求首先在温控条件下镜体自身变形很小,同时要求支撑结构由于温度变化产生的变形而引起的镜体变形也要足够小。图6所示的系统热变形分析结果表明,系统温度变化0.05 与镜体单独变化0.05 面形变化基本相同,由机械结构热变形引起的镜体面形变化为0.001 nm (RMS)量级水平。说明通过支撑装置选用宝钢或超宝钢材料,采用运动学支撑结构,同时配合环氧树脂粘接层结构,支撑装置在温度变化过程中对镜体的影响很小,满足物镜系统对支撑结构的要求。

参考文献:

- [1] WU B, KUMAR A. Extreme ultraviolet lithography: a review[J] . *J. Vac. Sci. Technol.*, 2007, B25(6) : 1743-1761.
- [2] HUDYMA R. An overview of optical systems for 30 nm resolution lithography at EUV wavelengths[J] . *SPIE*, 2002, 4832: 137-148.
- [3] STULEN R H, SWEENEY D W. Extreme ultraviolet lithography[J] . *IEEE J. Quantum Elec.*, 1999, 35: 649-699.
- [4] SOMMARGREN G E, PHILLION D W, JOHNSON M A. 100-picometer interferometry for EUVL[J] . *SPIE*, 2002, 4688: 316-320.
- [5] WAGNER C, HARNED N, KUERZ P, *et al.* . EUV into production with ASML s NXE platform[J] . *SPIE*, 2010, 7636: 76361H-1.
- [6] MIURA T, MURAKAMI K, SUZUKI K, *et al.* . Nikon EUVL development progress summary[J] . *SPIE*, 2006, 6151: 615105.
- [7] 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.
WANG ZH S, ZHAI Y, MEI G, *et al.* . Design of flexible support structure of reflector in space remote sensor[J] . *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(8) : 1833-1840. (in Chinese)
- [8] 闫勇, 贾继强, 金光. 新型轻质大口径空间反射镜支撑设计[J] . *光学 精密工程*, 2008, 16(8) : 1533-1539.
YAN Y, JIA J Q, JIN G. Design of new type spaceborne lightweighted primary mirror support[J] . *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(8) : 1533-1539. (in Chinese)
- [9] BLANDING D L. Principles of exact constraint mechanical design[C] . Eastman Kodak Company, Rochester, USA, 1992: 68-74.
- [10] TICHENOR D A, KUBIAK G D, REPLOGLE W C, *et al.* . EUV engineering test stand[J] . *SPIE*, 2000, 3997: 48-69.
- [11] OSHINO T, SHIRAISHI M, KANDAKA N, *et al.* . Development of illumination optics and projection optics for high-NA EUV exposure tool(HiNA) [J] . *SPIE*, 2003, 5037: 75-82.
- [12] KURZ P. Optics for EUV lithography[C] . 2nd International Workshop on EUV Lithography, Burlingame, USA, Oct. 2000.
- [13] 苗健宇, 张立平, 吴清文, 等. 测绘相机光学镜筒设计、加工及装配[J] . *光学 精密工程*, 2008, 16(9) : 1648-1653.
MIAO J Y, ZHANG L P, WU Q W, *et al.* . Design, manufacturing and assembly for optical lens of mapping camera[J] . *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(9) : 1648-1653. (in Chinese)

5 结 论

本文分析了符合运动学支撑要求的物镜实际支撑结构和面形检测用支撑结构。针对支撑结构性能分析和支撑方案中两个关键问题的处理进行了深入研究,并提出了相应解决方案,为极紫外光刻系统物镜光学元件支撑结构的设计评估提供了有价值的参考。各支撑结构有限元分析结果显示,通过对支撑方案总关键问题的合理处理,运动学支撑结构热力性能和力学性能良好,能够满足极紫外光刻系统对于物镜机械支撑结构的要求。

作者简介: 王 辉(1985—), 男, 河北唐山人, 研究实习员, 主要从事光学元件支撑结构设计方面的研究。

E-mail: wangh-19850322@163.com

《发光学报》

EI 收录中文核心期刊

《发光学报》是中国科学院长春光学精密机械与物理研究所与中国物理学会发光分会共同主办的中国物理学会发光分会的学术会刊。该刊是以发光学、凝聚态物质中的激发过程为专业研究方向的综合性学术刊物。

《发光学报》于1980年创刊, 曾于1992年, 1996年, 2000年和2004年连续四次被《中文核心期刊要目总览》评为“物理学类核心期刊”, 并于2000年同时被评为“无线电电子学、电信技术类核心期刊”。2000年获中国科学院优秀期刊二等奖。现已被《中国学术期刊(光盘版)》、《中国期刊网》和“万方数据资源系统”等列为源期刊。英国《科学文摘》(SA)自1999年; 美国《化学文摘》(CA)和俄罗斯《文摘杂志》(AJ)自2000年; 美国《剑桥科学文摘社网站》自2002年; 日本《科技文献速报》(CBST, JICST)自2003年已定期收录检索该刊论文; 2008年被荷兰“Elsevier Bibliographic Databases”和“EI”确定为源期刊。2001年在国家科技部组织的“中国期刊方阵”的评定中, 《发光学报》被评为“双效期刊”。2002年获中国科学院2001~2002年度科学出版基金“择重”资助。2004年被选入《中国知识资源总库·中国科技精品库》。

本刊内容丰富、信息量大, 主要反映本学科专业领域的科研和技术成就, 及时报道国内外的学术动态, 开展学术讨论和交流, 为提高我国该学科的学术水平服务。

《发光学报》为双月刊, A4开本, 144页, 国内外公开发行。国内定价: 40元, 全年240元, 全国各地邮局均可订阅。《发光学报》欢迎广大作者、读者广为利用, 踊跃投稿。

主管单位: 中国科学院

主办单位: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所、中国物理学会发光分会

地 址: 长春市东南湖大路3888号 《发光学报》编辑部

邮 编: 130033

电 话: (0431) 86176862, 84613407

E-mail: fgxbt@126.com

国内统一刊号: CN 22-1116/O4

国际标准刊号: ISSN 1000-7032

国内邮发代号: 12-312

国外发行代号: 4863BM

http: //www. fgxb. org