

# 用于极紫外光刻非球面光学元件检测的补偿器检测系统

王丽萍 张海涛

(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** 为了实现极紫外光刻(EUVL)投影物镜光学元件均方根(RMS)0.2~0.3 nm 的面形检测精度要求,研究了超高精度光学元件检测方法。采用误差分解控制方法,设计了非球面补偿器检测系统。补偿器由提供透射球面波的前组元件及产生非球面分量的球面元件组成,可通过对补偿器前组的标定及后组元件的参数控制保证系统测量精度。分析了非球面补偿器检测系统的主要误差来源,提出了环境误差及补偿器前组波像差的控制参数,通过误差分类评估了系统检测精度。非球面补偿器的检测 RMS 达 0.245 nm,能够实现超高精度的极紫外光刻非球面元件检测。

**关键词** 测量;非球面补偿器;光学设计;极紫外光刻

中图分类号 O436 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201239.s208002

## Aspherical Null Testing System for Extreme Ultraviolet Lithography Mirrors

Wang Liping Zhang Haitao

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

**Abstract** Calling for diffraction limited imaging performance, extreme ultraviolet lithography (EUVL) demands unprecedented requirements for figure metrology. The aspherical surface of EUVL mirrors must be measured with higher accuracy. Root mean square (RMS) is 0.2~0.3 nm. The design of interferometric null metrology is focused on, which can produce such highly precise figure of aspherical surfaces. The null lens is splited into a transmission sphere and a single lens. The errors introduced by the interferometer and the transmission sphere can be calibrated, and the error from the single lens can be rigidly controlled to guarantee the system testing accuracy. The residual aberration of the null testing system is controlled to be smaller than  $0.003\lambda$  in the system. The main error sources of the null testing system are analyzed, the parameters of environmental control are proposed as well as limite residual aberration of the transmission sphere. Furthermore, the error sources are classified and the measurement accuracy of our aspherical null testing system is evaluated, RMS reaches 0.245 nm. It can meet the requirements of EUVL optics testing.

**Key words** measurement; aspherical null lens; optical design; extreme ultraviolet lithography

**OCIS codes** 220.4840; 220.1250; 220.3620

## 1 引言

极紫外光刻(EUVL)工作波长为 13~14 nm,适用于特征尺寸为 22 nm 及其以下数代超大规模集成电路光刻工艺。随着 ASML 公司 22 nm 极紫

外(EUV)预量产型光刻机 NEX3300 的研制,EUVL 技术已进入产业化前夜<sup>[1,2]</sup>。在 EUV 波段任何材料都不具备足够的透射率,光学系统必须采用镀有多层膜的反射式光学元件,而正入射时 EUV

收稿日期:2012-06-10;收到修改稿日期:2012-07-09

基金项目:国家科技重大专项资助课题。

作者简介:王丽萍(1981—),女,博士,副研究员,主要从事光学设计和检测技术等方面的研究。

E-mail: wlp8121@126.com

多层膜最高反射率只能达到 70%。EUV 光学系统应控制元件数量以提高能量利用率。考虑到扫描曝光时掩模和硅片位于系统同侧引起的硅片移动受限、光路内机械结构的遮拦等影响,EUV 物镜采用不多于八的偶数片光学元件。对数值孔径(NA)为 0.25~0.32 的环形视场 EUV 物镜采用六片光学元件<sup>[3,4]</sup>。为了兼顾 EUVL 投影物镜成像质量达到衍射极限的要求,光学元件需要非球面化,且非球面元件的面形误差均方根(RMS)值应控制在 0.2~0.3 nm。与此相对应的非球面光学元件面形检测 RMS 值应达到 0.2~0.3 nm。在日本、美国及欧洲,EUVL 技术经过近 30 年的发展,超高精度 EUV 光学元件检测技术已相对成熟<sup>[5~8]</sup>。Miura 等<sup>[9]</sup>的 EUV 非球面元件面形检测 RMS 值已达到 27 pm。我国的超高精度 EUV 光学元件检测技术正处于起步阶段<sup>[10]</sup>,本文针对我国在研的小视场 EUVL 机演示验证装置中投影物镜的光学元件检测,设计了基于菲索干涉仪结构的补偿器非球面光学元件检测系统。分析了主要误差因素,评估了检测精度。

## 2 EUVL 光学元件检测需求

为实现优于 22 nm 的成像分辨率,除采用离轴照明及相移掩模等分辨率提高技术以外,EUVL 投影物镜的成像质量需达到衍射极限,根据 Marechal 条件,EUV 物镜出瞳处波像差  $W_{ep}$  的 RMS 应满足:

$$W_{ep\text{rms}} \leq \lambda/14. \quad (1)$$

EUVL 机工作波长在 13.5 nm,对于六镜系统分配到每个非球面元件的面形误差 RMS 值为 0.2~0.3 nm。

## 3 补偿器检测系统光路设计

干涉检验获得的是参考波面与被测波面的相对差异,其测量精度取决于参考波面的精度。球面检测时利用旋转平移标定方法,将参考球面波的测量精度 RMS 提高到 0.1 nm。当参考球面波被标定后,可以获得被检面的绝对检测精度。非球面元件检测时,设计补偿器以产生非球面参考波与待检波面发生干涉,测量精度取决于产生的非球面参考波误差<sup>[11,12]</sup>。

### 3.1 设计原理

补偿器产生的非球面参考波误差可分为旋转对称误差及非旋转对称误差,干涉仪及补偿器的高阶非对称误差可通过旋转法标定;而旋转对称误差无

法直接标定<sup>[8]</sup>。采用误差分解控制方法,将补偿器分成两组设计:前组提供透射球面波,后组将前组提供的球面波转化为与待检镜匹配的非球面波<sup>[5]</sup>。补偿器产生的非球面参考波面旋转对称误差由干涉仪、补偿器前组及后组的对称误差构成,干涉仪及补偿器前组的旋转对称误差 RMS 值可通过旋转平移法标定到 0.1 nm。因此非球面参考波的精度主要取决于无法标校的后组,后组引入的误差需通过估算获得,将后组设计成单个球面元件以减少误差因素控制精度。

EUVL 投影物镜采用旋转对称的非球面光学元件,补偿器中光学元件全部为球面光学元件。补偿器检测光路如图 1 所示,干涉仪及补偿器前组元件(TS)的系统误差可通过旋转平移方式精确标定。非球面检测时,用补偿器单镜及待检非球面代替标定球面镜。由 TS 产生的球面波经单镜转化后到达待检非球面,然后沿原路返回,干涉仪和 TS 的光路与标定状态相同。

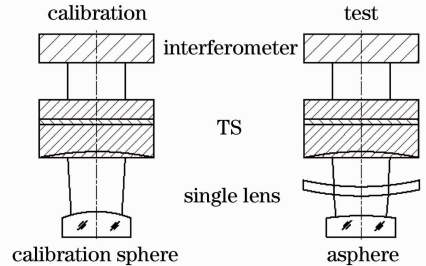


图 1 非球面补偿器分组测试原理

Fig. 1 Metrology concept for the aspherical mirror

### 3.2 设计结果

补偿器设计过程中兼顾了元件加工、检测及装调因素<sup>[13,14]</sup>,控制了干涉腔长、球面元件曲率及补偿镜单镜光线入射角等参数。针对小视场 EUVL 机演示验证装置投影物镜中的非球面凸镜及凹镜,设计了相应的补偿器检测系统。

图 2 和图 3 是非球面凸镜及凹镜的矢高图,凸非球面通光口径为 60 mm,相对于最佳拟合球的非球面度为 5.6  $\mu\text{m}$ ,非球面陡度为 -1.2  $\mu\text{m}/\text{mm}$ 。凹非球面通光口径为 190 mm,相对于最佳拟合球的非球面度为 6.8  $\mu\text{m}$ ,非球面陡度为 -0.5  $\mu\text{m}/\text{mm}$ 。

图 4 和图 5 是非球面凸镜的检测光路及标定光路,为减小环境因素对测量结果的影响,将干涉腔长控制在 300 mm。图 6 和图 7 是非球面凸镜的检测光路及标定光路的残余波像差,检测光路系统残余波像差 RMS 值为 0.00155 $\lambda$ , $\lambda=632.8$  nm,标定光路的残余波像差 RMS 值为 0.00123 $\lambda$ , $\lambda=632.8$  nm。

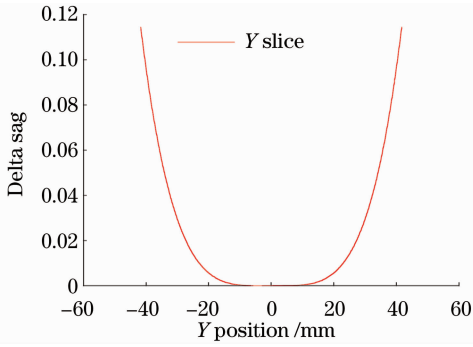


图 2 非球面凸镜矢高图

Fig. 2 Surface sag from base of the convex mirror

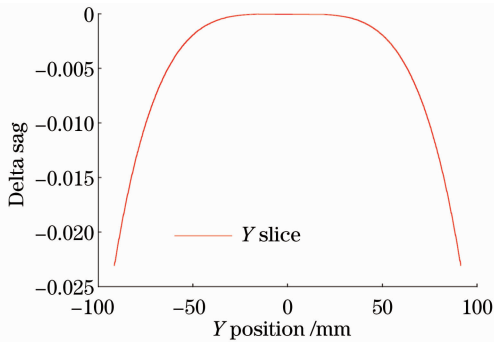


图 3 非球面凹镜矢高图

Fig. 3 Surface sag from base of the concave mirror

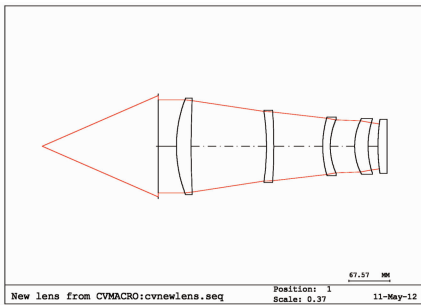


图 4 非球面凸镜检测光路

Fig. 4 Null testing system for the convex mirror

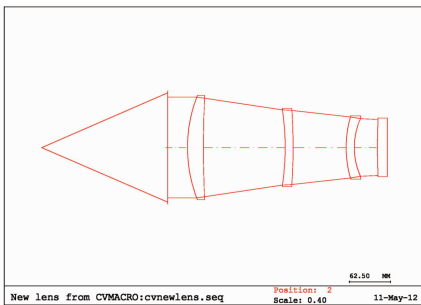


图 5 非球面凸镜透射波面标定光路

Fig. 5 Transmission sphere for the convex mirror

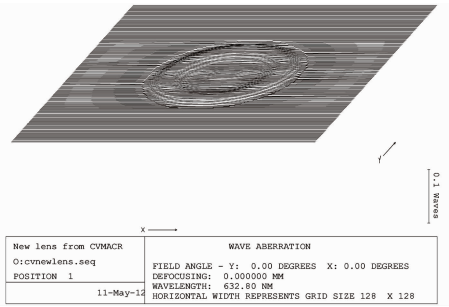


图 6 非球面凸镜的检测光路残余波像差  
Fig. 6 Residual aberration of the null testing system for the convex mirror

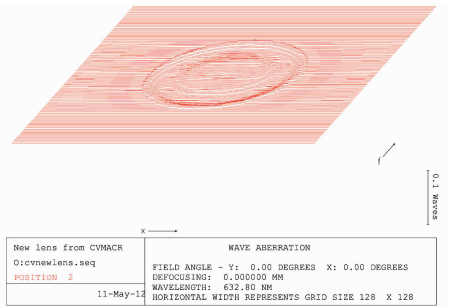


图 7 非球面凸镜透射波面标定光路残余波像差  
Fig. 7 Residual aberration of the transmission sphere for the convex mirror

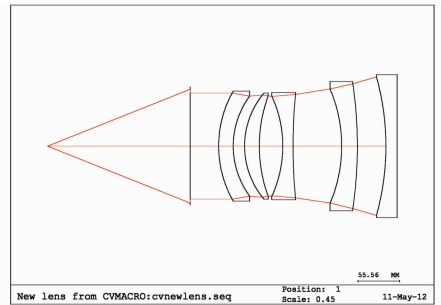


图 8 非球面凹镜检测光路

Fig. 8 Null testing system for the concave mirror

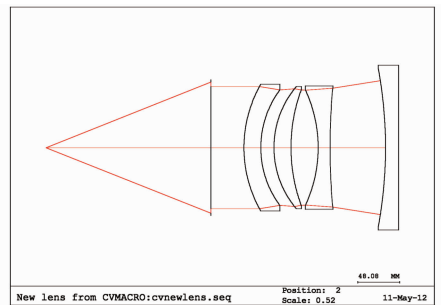


图 9 非球面凹镜透射波面标定光路

Fig. 9 Transmission sphere for the concave mirror

图 8 和图 9 是非球面凹镜的检测光路及标定光路,干涉腔长控制在 230 mm。图 10 和图 11 是非球面凸镜的检测光路及标定光路的残余波像差,检测

光路系统残余波像差 RMS 值为  $0.00293\lambda$ ,  $\lambda = 632.8 \text{ nm}$ , 标定光路的残余波像差 RMS 值为  $0.00242\lambda$ ,  $\lambda = 632.8 \text{ nm}$ 。

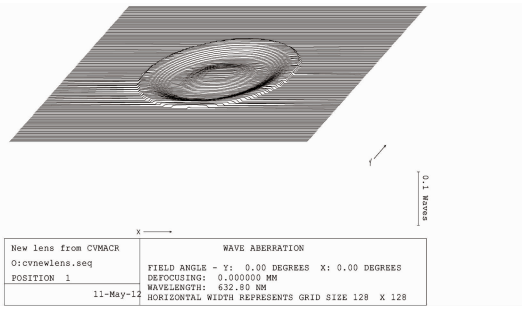


图 10 非球面凹镜的检测光路残余波像差  
Fig. 10 Residual aberration of the null testing system for the concave mirror

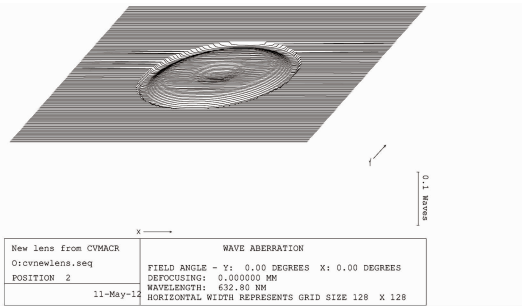


图 11 非球面凹镜透射波面标定光路残余波像差  
Fig. 11 Residual aberration of the transmission sphere for the concave mirror

如何实现高精度元件面形检测是设计中必须考虑的问题,常规元件面形检测需借助于标准具。凹镜面形检测时对标准具参数的依赖程度相对较低,凸镜面形检测则需具有与其参数相匹配的标准具。补偿器设计过程参考 Zygo 及 CVI 标准具参数,控制了元件凸面曲率半径,使元件的加工及检测具有可行性。图 12 和图 13 是凸镜及凹镜补偿器系统中元件凸面参数与标准具的符合关系图,由图可看出设计元件中的凸面面形都可以利用现有标准具进行检测,降低了加工风险。

## 4 误差源

### 4.1 随机误差

测量重复精度是指在相同条件下多次测量结果之间的差异,主要取决于振动、空气扰动和数据采集误差等随机误差。由振动及数据采集造成的随机误差可以通过短时期内的帧平均和相位平均进行抑制,而长周期内的空气扰动不能借助平均消除。

#### 4.1.1 环境误差

为提高测试精度,干涉测量系统在参考光和测试光中引入相移量产生连续的移相干涉图,通过数据处理得到被检波像差。补偿器检测系统的参考面

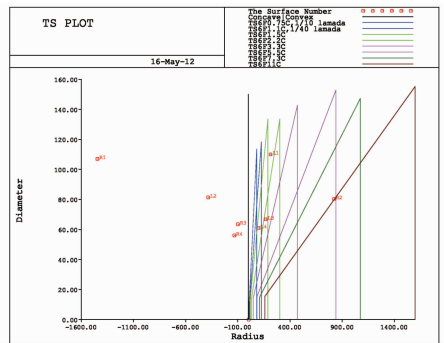


图 12 凸镜补偿器元件参数与标准具对照图  
Fig. 12 TS plot with radius of the null lens for convex mirror

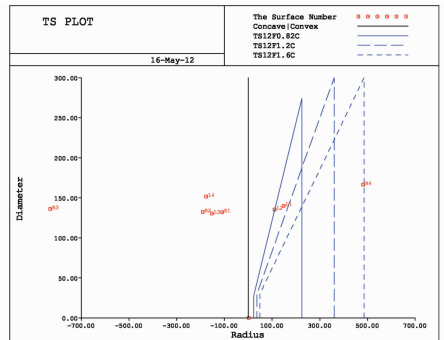


图 13 凹镜补偿器元件参数与标准具对照图  
Fig. 13 TS plot with radius of the null lens for concave mirror

位于 TS 镜组前的平板前表面,通过平板位移引入相移。从平板经补偿器至待检非球面部分为干涉腔,系统设计过程控制干涉腔腔长小于 350 mm。由于干涉腔较长且属非共光路部分。空气扰动引入的误差是影响测量重复精度的最主要因素。对于移相干涉仪来说,空气扰动误差会引起波面的随机变化,从而导致干涉条纹无规则变化,严重地影响移相干涉测量。空气扰动误差分为两部分:1) 空气折射率的不稳定引起的误差,空气折射率的不稳定通常是由空气的温度、压强和相对湿度的不稳定引起的,空气折射率的不稳定会引起两束光的光程差随机变化,严重影响检测精度;2) 空气折射率梯度及空气折射率梯度的不稳定引起的误差,对于干涉腔来说,由于部分热源的存在以及空气气流的存在,导致干涉腔内存在一定的温度梯度,并且地球上的流体由于地球引力的作用而存在压强梯度,所以考虑干涉腔内的折射率梯度主要是由温度梯度和压强梯度引起的。采用 13 步相移算法对误差源引起的测试误差进行抑制,根据 13 步相移算法的分析结果,要实现 RMS 值为 0.1 nm 的超高检测精度,环境控制应满足以下条件:干涉腔温度变化范围为  $\pm 0.005\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,温度梯度变

化范围为  $0\sim 0.01\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，压强变化范围为  $\pm 1\text{ Pa}$ ，压强梯度变化范围为  $0\sim 2\text{ Pa}$ ，湿度变化范围为  $\pm 5\text{ Pa}$ 。

在 F 级振动标准(VC-F)的振动条件下,通过帧平均和相位平均能有效地抑制振动带来的影响。

#### 4.1.2 数据采集

数据采集过程中包含的误差有移相误差、探测器的响应非线性误差,数据转换过程中获得的探测器的量化误差、激光器的强度不稳定误差和频率不稳定误差。当环境控制达到要求时,测量波面重复性可实现 RMS 值为  $0.1\text{ nm}$ 。

### 4.2 系统误差

#### 4.2.1 TS 镜组

TS 镜组的作用是提供透射球面波,其产生的旋转对称误差 RMS 及非旋转对称误差 RMS 可通过旋转平移法标定到  $0.1\text{ nm}$ 。标定精度与 TS 镜组波像差量值相关,利用高阶插值图像旋转法计算出在转台径向跳动误差为  $2\text{ }\mu\text{m}$ ,在旋转精度为  $2^{\circ}$  条件下,TS 镜组波像差峰谷(PV)值小于  $\lambda/10$  时,标定精度 RMS 值可达到  $0.1\text{ nm}$ 。

对于上述非球面凸镜补偿器检测系统,当 TS 镜存在 PV 值为  $\lambda/10$  的球差时(非旋转对称误差可进行标定,不在此考虑),将引入回程误差。 $W_{1\text{rms}}$  为 TS 镜未引入球差时获得的检测波面的 RMS, $W_{\text{TSrms}}$  为 TS 镜经标定获得的波面的 RMS, $W'_{1\text{rms}}$  为 TS 镜引入 PV 值为  $\lambda/10$  球差时获得的检测波面的 RMS, $W'_{\text{TSrms}}$  为 TS 镜引入 PV 值为  $\lambda/10$  球差后标定获得的波面的 RMS。如图 14 所示,由 TS 球差引入的回程误差为

$$\Delta_{\text{rms}} = (W_{1\text{rms}} - W_{\text{TSrms}}) - (W'_{1\text{rms}} - W'_{\text{TSrms}}) = 0.006\text{ nm}. \quad (2)$$

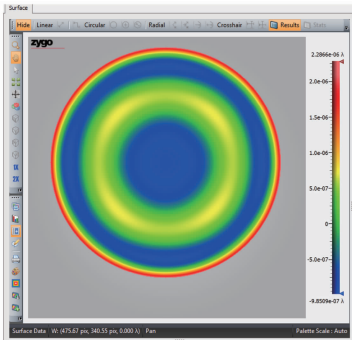


图 14 TS 球差引入的回程误差

Fig. 14 Retrace error induced by spherical aberration of TS

#### 4.2.2 补偿器单镜

补偿器检测精度依赖于其提供的参考非球面波

的质量,补偿器单镜的加工及装调误差是引起参考非球面波旋转对称误差的主要因素。补偿器单镜参数可控制在一定精度之内,表 1 列出了相关参数的测量精度。

表 1 参数测量精度

Table 1 Parameter measurement accuracy

Parameters	Measurement accuracy
Sphere radius ( $\Delta R/R^2$ ) / $\text{mm}^{-1}$	$\leq 10^{-7}$
Center thickness / $\mu\text{m}$	1
Are space / $\mu\text{m}$	2
Uniformity of refractive indice $\Delta n$	$\leq 5 \times 10^{-6}$
Shape error RMS of spherical surface / $\text{nm}$	0.1

实际测量过程中的测量精度取决于待检非球面参数以及补偿器的设计,补偿器单镜将会引入 RMS 值为  $0.2\text{ nm}$  的系统误差。

### 5 补偿器检测系统精度评估

非球面补偿器检测系统中的几个主要误差因素有环境引入的随机误差 A、TS 镜组引入的系统误差 B 及补偿器单镜引入的系统误差 C。补偿器检测系统精度  $\delta$  为

$$\delta = \sqrt{A^2 + B^2 + C^2} = \sqrt{0.1^2 + 0.1^2 + 0.2^2} = 0.245\text{ nm}. \quad (3)$$

### 6 结 论

设计了适用于 EUVL 非球面元件检测的补偿器检测系统。通过将补偿器分为旋转对称误差可标定的 TS 组及引入旋转对称误差最小的单镜,完成了 EUVL 机演示系统中非球面凸镜及凹镜的补偿器检测系统光学设计,有效地控制了补偿器引入的旋转对称误差。分析了检测过程的主要误差来源,评估得出采用此分组法设计的补偿器检测能够实现 RMS 值为  $0.245\text{ nm}$  的检测精度,满足 EUVL 非球面元件检测需求。

#### 参 考 文 献

- Martin Lowisch, Peter Kuerz, Hans-Juergen Mann *et al.*. Optics for EUV production[C]. *SPIE*, 2010, **7636**: 763603
- Hakaru Mizoguchi, Tamotsu Abe, Yukio Watanabe *et al.*. 100 W 1st generation laser-produced plasma light source system for HVM EUV lithography[C]. *SPIE*, 2011, **7969**: 796908
- David C. Brandt, Igor V. Fomenkov, Alex I. Ershov *et al.*. LPP source system development for HVM[C]. *SPIE*, 2011, **7969**: 79691H
- Masaki Yoshioka, Yusuke Teramoto, Jeroen Jonkers *et al.*. Tin DPP source collector module(SoCoMo) ready for integration into beta scanner[C]. *SPIE*, 2011, **7969**: 79691G

- 5 Gunther Seitz, Stefan Schulte, Udo Dinger *et al.*. EUV-microlithography-a challenge for optical metrology[C]. *SPIE*, 2004, **5533**: 20~26
- 6 Udo Dinger, Gunther Seitz, Stefan Schulte *et al.*. Fabrication and metrology of diffraction limited soft X-ray optics for the EUV microlithography[C]. *SPIE*, 2004, **5193**: 18~28
- 7 U. Dinger, F. Eisert, H. Lasser *et al.*. Mirror substrates for EUV-lithography: progress in metrology and optical fabrication technology[C]. *SPIE*, 2000, **4146**: 35~46
- 8 Yuichi Takigawa, Shigeru Nakayama, Takahiro Yamamoto *et al.*. Absolute accuracy evaluation of aspherical null testing[C]. *SPIE*, 2005, **5869**: 58690Q
- 9 Takaharu Miura, Katsuhiko Murakami, Hidemi Kawai. Nikon EUVL development progress update [ C ]. *SPIE*, 2010, **7636**: 76361G
- 10 Xu Chen, Weiqi Liu, Yusi Kang *et al.*. Design and tolerance analysis of compensator for high order aspheric surface testing [C]. *SPIE*, 2009, **7511**: 751119
- 11 T. Gemma, S. Nakayama, Y. Takigawa *et al.*. Null testing at 1 nm accuracy for sub-mm asphericity[C]. *Optical Fabrication and Testing*, 2002. **OWD4**
- 12 Kenneth A. Goldberg, Patrick P. Naulleau, Senajith B. Rekawa *et al.*. Ultra-high accuracy optical testing: creating diffraction-limited short-wavelength optical system [ C ]. *SPIE*, 2005, **5900**: 59000G
- 13 Guo Peiji, Yu Jingchi. Some problems about compensator designing[J]. *Optical Technique*, 2006, **32**(1): 118~120  
郭培基, 余景池. 设计非球面检测用补偿器应注意的几个问题 [J]. *光学技术*, 2006, **32**(1): 118~120
- 14 Chris J. Evans, Robert N. Kestner. Test optics error removal [J]. *Appl. Opt.*, 1996, **35**(7): 1015~1021

栏目编辑:何卓铭