

# 基于面形检测的光学元件多层膜均匀性测量

王 辉 周 烽 喻 波 谢 耀 于 杰 刘 钰 王 丽 萍

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** 为了测量光学元件多层膜膜厚均匀性指标,基于面形检测对多层膜均匀性测量方法进行了研究。分析了均匀性的测量过程以及影响因素,评估了元件面形检测复现性对测量结果的影响,建立了多层膜结构的有限元模型,计算分析膜层内应力对基底面形带来的影响。基于高复现性面形检测装置进行了测量方法的实验验证工作,实验结果表明:元件面形测量口径范围内膜厚分布均匀性优于0.1 nm[均方根(RMS)值];将测试结果转化为沿径向的轮廓分布结果,与基于反射率计的膜厚检测数据进行了对比,表明两种方法测试数据基本吻合,验证了基于面形检测方法评估光学元件多层膜均匀性的可行性。

**关键词** 测量;光刻技术;有限元分析;高复现性支撑装置;薄膜均匀性测量

**中图分类号** TH122 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/CJL201542.0708010

## Measurement of Thickness Uniformity of Optic Multilayer Based on Surface Figure Measurement

Wang Hui Zhou Feng Yu Bo Xie Yao Yu Jie Liu Yu Wang Liping

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

**Abstract** In order to evaluate the multilayer thickness uniformity of the optics, the measurement method based on optic figure reproducibility metrology is studied. The process of uniformity measurement and the influence factors are analyzed, and the measurement errors due to the reproducibility metrology are evaluated. The finite element analysis (FEA) model of the multilayer is built and the optic figure error due to the inner stress of the multilayer is calculated. The uniformity measurement is carried out on the high reproducibility metrology device, and the results indicate that the multilayer thickness uniformity of the optic in clear aperture is better than 0.1 nm (root mean square). When the results are transformed to thickness profile along the radial points on the optic and compared with the reflectometry test results it is shown that, the uniformity results based on reproducibility metrology are reliable. The experimental results verify the feasibility and the practicability of the measurement method of the multilayer thickness uniformity.

**Key words** measurement; lithography technology; finite element analysis; high reproducibility mount; multi-layer uniformity measurement

**OCIS codes** 120.4640; 120.4800; 040.7480

## 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极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。极紫外光刻技术(EUVL)采用13.5 nm波长光源曝光,被认为是最具潜力的下一代光刻技术之一<sup>[1-4]</sup>。为了实现近衍射极限分辨率要求,极紫外光刻光学系统要求光学元件达到深亚纳米量级面形精度,对光学系统设计集成、元件加工和检测、光学薄膜、

收稿日期: 2015-03-04; 收到修改稿日期: 2015-03-18

基金项目: 国家科技重大专项

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

极紫外光源、波像差测量等关键技术<sup>[5-8]</sup>提出了严峻的挑战。

作为极紫外光刻技术中极为重要的环节,Mo/Si多层膜技术的目标是实现高反射率、均匀膜厚以及高稳定性等性能指标要求<sup>[9-12]</sup>。Mo/Si多层膜膜层厚度分布不均匀会在光学元件面形上引入额外像差,为了保证光学系统的成像质量,必须严格控制元件面形误差中多层膜的贡献量。以EUVL两镜系统为例,为了达到近衍射极限分辨率要求,单个元件面形指标[均方根(RMS)值]优于0.25 nm,多层膜的贡献量需要控制在0.1 nm (RMS值)以内,相应多层膜膜厚均匀性检测指标需要优于0.05 nm(RMS值)。对于面向产业化的EUVL六镜系统,多层膜贡献量控制及检测精度要求更为苛刻。

目前测量多层膜膜层厚度均匀性的常用手段是使用专用设备,如X射线衍射仪、反射率计等,在基底元件表面选择离散点,测量各采样点的薄膜周期厚度<sup>[13-14]</sup>。这种测量方法精度较高,但是采样点测量和处理耗时较长,在实际工程应用尤其在镀膜工艺开发和收敛过程中,需要进行大量采样点的反复多次测量,工作量大。本文针对光学元件多层膜均匀性测量方法进行了研究,分析了元件面形复现性表征膜厚均匀性的可行性,建立了元件多层膜结构的物理模型,计算评估了镀膜应力因素对基底面形带来的影响,结合课题组研制的高复现性元件支撑装置,对基于面形检测的多层膜均匀性测量方法进行了实验验证工作,最后对实验结果进行了总结。

## 2 测量方法

这里测量分析镀膜均匀性的方法是对镀膜前后的基底进行面形检测,通过衡量基底面形的改变量来表征镀膜膜的均匀性分布,应用该方法进行膜层均匀性测量有两个前提条件:1)镀膜前后基底面形检测需要具备一定的复现性。为了确定该方法测量膜层均匀性的能力,在面形检测过程中使用课题组研制的元件高复现性支撑装置<sup>[15]</sup>,最大限度控制镀膜前后支撑装置引入的面形误差。2)基于面形检测评估膜厚均匀性,仅考虑面形误差中多层膜的实际贡献量。从镀膜膜层均匀性对光学系统造成的影响分析,通常将膜层引入的像差分为可补偿像差与非可补偿像差,可补偿部分指系统装调过程中可以通过元件位置改变进行补偿的像差,主要包括元件面形中的倾斜项和离焦项;非可补偿部分是膜厚分布的测量结果中去除可补偿部分后的剩余部分,是面形误差中多层膜的实际贡献量。

### 2.1 镀膜前基底面形检测

利用元件面形检测装置,如图1(a)所示,测试支撑状态下镀膜基底的初始面形,得到镀膜前的面形测试结果

$$W_1 = W_{p1} + W_T, \quad (1)$$

式中  $W_1$  是镀膜前面形测试数据中去掉倾斜和离焦项后的结果,  $W_{p1}$  是镀膜前支撑状态下基底元件的面形,  $W_T$  是干涉测量中参考镜面形数据。

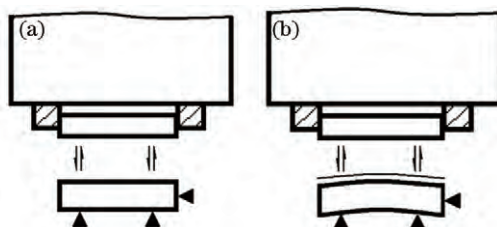


图1 膜厚均匀性测量过程。(a)镀膜前基底面形检测;(b)镀膜后基底面形检测

Fig.1 Measurement process of multilayer thickness uniformity. (a) Figure measurement before coating; (b) figure measurement after coating

### 2.2 镀膜后基底面形检测

基底元件镀膜后,在检测装置上重新安装镀膜元件,测试支撑状态下元件的面形,如图1(b)所示,得到镀膜后的面形测试结果

$$W_2 = W_{p2} + W_T + W_{repr}, \quad (2)$$

式中  $W_2$  是镀膜后面形测试数据中去掉倾斜和离焦项后的结果,  $W_{p2}$  是镀膜后支撑状态下基底元件的面形,  $W_{repr}$  是检测装置的测量复现性。

镀膜前后基底面形改变量中,除了包含膜层厚度分布数据以外,通常还包含镀膜应力引起的面形变化信息,即

$$W_{p2} = W_{p1} + W_{\text{hum}} + W_{\text{stress}}, \quad (3)$$

式中  $W_{\text{hum}}$  是膜层在面形上的厚度分布数据,  $W_{\text{stress}}$  是镀膜应力造成的面形变化信息。将(1)、(2)式代入(3)式得到

$$W_2 - W_1 = W_{\text{hum}} + W_{\text{repr}} + W_{\text{stress}}. \quad (4)$$

由(4)式可见,镀膜前后的元件面形测量结果的差值包含了膜层厚度均匀性分布数据、镀膜应力引入的面形变化信息以及检测装置的测量复现性影响,这些信息对膜厚均匀性测量结果的影响将在第3部分进行具体的分析计算。

### 2.3 数据转换

(4)式得出的均匀性分布数据  $W_{\text{hum}}$  理论上包含了膜层厚度在整个元件面形范围内的分布信息。在实际工程应用中,镀膜过程中沿圆周对称方向的膜厚均匀性易于保证,通常采用基底表面径向离散点采样方式测量各位置的薄膜周期厚度。为了与传统的测试手段进行对比,对均匀性分布数据  $W_{\text{hum}}$  进行处理,将面形形式的均匀性数据转换为径向轮廓曲线形式数据。应用  $N$ -position 方法<sup>[16]</sup>,将均匀性测量结果  $W_{\text{hum}}$  相对于数据中心点沿圆周方向进行  $N$  等分旋转,所得的  $N$  个结果进行数据平均,得到

$$W_{\text{hum}}^{\text{sys}} = \frac{\sum_{i=1}^N W_{\text{hum}}^{\varphi}}{N} - W_{\text{hum}}^{kN\theta}, \quad (5)$$

式中  $W_{\text{hum}}^{\text{sys}}$  是均匀性测量结果中沿旋转对称部分像差,  $W_{\text{hum}}^{\varphi}$  是将  $W_{\text{hum}}$  数据  $N$  等分旋转至每个位置对应的结果,  $W_{\text{hum}}^{kN\theta}$  是  $N$  等分旋转无法去除的旋转非对称部分,  $\varphi = i \cdot 2\pi/N, i = 1, 2, \dots, N$ 。

## 3 测量结果影响因素分析

### 3.1 面形检测复现性影响

影响检测装置复现性的因素主要有两个:1)面形检测装置的测量重复性;2)元件支撑装置引入的复现性误差。面形检测过程中进行多次测量平均可以有效的提高测量重复性,根据文献[17],对于 Fizeau 型干涉仪,在干涉图对比度为 50%、量化深度为 8 bit 的情况下,使用 13 步移相干涉测量时理论 RMS 不确定度为 0.4 nm,进行 64 次平均后不确定度降低至 50 pm,面形测量重复性在干涉腔 100 mm 以上时受环境影响严重,达到上述指标需考虑精密温控;均匀性测量过程中需要将基底元件从检测装置取出,镀膜后重新进行元件安装调整,二次装卡过程支撑装置会在元件上引入额外的面形误差。经过特殊设计的高复现性支撑装置<sup>[15]</sup>,理论上能够实现的支撑复现性  $\sigma_m$  优于 30 pm。综合考虑检测重复性与支撑复现性因素,面形检测复现性影响为

$$W_{\text{repr}} = \sqrt{\sigma_{\text{repr}}^2 + \sigma_m^2} = 60 \text{ pm}. \quad (6)$$

### 3.2 膜层应力影响

镀膜过程通常会在镀膜膜层中引入残余内应力,以 Mo/Si 多层膜为例,不同的沉积条件 Mo/Si 多层膜会在基底表面引入 300~500 MPa 的压应力<sup>[18-20]</sup>,在膜层内应力的作用下基底表面面形会发生一定变化。膜层内应力与基底面形变化之间的关系一般采用 Stoney 公式进行评估<sup>[21]</sup>,在镀膜基底为圆周对称结构、膜层与基底厚度均匀情况下,

$$\delta = \sigma_t t_f \left( \frac{r_s^2}{t_s^2} \right) \frac{3(1 - \nu_s)}{E_s}, \quad (7)$$

式中  $\delta$  表示基底面形变化,  $\sigma_t$  表示膜层内应力,  $t_f$  表示膜层厚度,  $r_s$  表示基底表面测量点位置,  $t_s$  表示基底厚度,  $E_s$  和  $\nu_s$  分别表示基底材料的杨氏模量和泊松比。

按照 Stoney 公式的计算分析,膜层应力造成的基底面形变化中主要像差是离焦项,根据第2节所述离焦项属于像差中的可补偿部分,该部分在均匀性测量中直接去除,其他残余像差才是影响均匀性测量的部分。为了评估膜层应力引入的残余像差,在 Ansys 有限元分析软件中建立了计算模型,分析镀膜内应力对基底面形造成的影响,并与 Stoney 公式计算结果对比验证。模型中光学基底选择口径 200 mm、中心厚 55 mm、

曲率半径 340 mm 的球面镜,基底材料选择康宁 ULE,物理属性如表 1 所示,镀膜膜层厚度 280 nm,膜层内应力按 500 MPa 的压应力计算。

表 1 材料物理属性表  
Table 1 Material properties

Material	Density /(kg/m <sup>3</sup> )	Young's modulus /GPa	Poisson's ratio
ULE	2560	96.7	0.25

仿真结果如图 2 所示,元件有效口径范围内基底面形变化峰谷(PV)值 9.3 nm,RMS 值 2.77 nm,其中绝大部分像差是离焦项,属于面形误差中的可补偿部分。基底面形变化中去除离焦项后的残余像差是膜层应力对面形误差的实际贡献量,其 RMS 值小于 0.06 nm,约占基底面形变化的 2%。因此对于仿真计算中光学基底,膜层内应力对均匀性测量的影响为

$$W_{\text{stress}} = 60 \text{ pm} . \tag{8}$$

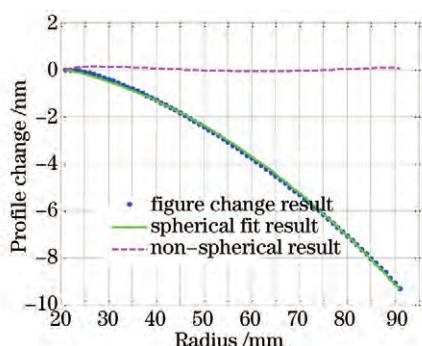


图 2 镀膜应力引起面形变化仿真结果

Fig.2 Calculation of optic figure change due to inner stress of multilayer

#### 4 测量实验

针对基于面形检测的多层膜均匀性测量方法开展了实验验证工作,实验中测试基底选择一块口径 200 mm、中心厚 55 mm、曲率半径 340 mm 的球面镜,基底支撑选择高复现性支撑装置,面形检测使用一台 Zygo 公司 DynaFiz 6 寸干涉仪,检测环境温控条件优于 0.1 °C。基底元件镀制 Mo/Si 多层膜,单层 Mo/Si 膜厚 7 nm,镀制 40 层总厚度 280 nm。

按照第 2 节的方法,在镀膜前进行基底元件面形检测,面形测试数据中去掉倾斜和离焦项后的结果为  $W_1$ ,如图 3(a)所示;镀制多层膜后进行基底元件面形检测,测试数据中仍去掉倾斜和离焦项,其结果为  $W_2$ ,如图 3(b)所示; $W_2$  与  $W_1$  之差为膜层厚度在整个元件面形范围内原始分布信息  $W_{\text{hum}}$ ,其 RMS 值为 0.5 nm,如图 3(c)所示;考虑实际膜层均匀性分布情况,对  $W_{\text{hum}}$  面形数据进行 Zernike 36 项拟合,拟合结果如图 3(d)所示,其 RMS 值为 0.1 nm。

考虑(4)式,  $W_{\text{hum}}$  拟合结果中包含面形检测复现性  $W_{\text{repr}}$  以及膜层应力  $W_{\text{stress}}$  的影响,因此认为实际膜层均匀性分布优于 0.1 nm(RMS 值)。

为了验证测量结果的准确性,对镀膜基底进行基于反射率计的膜厚检测,沿元件径向进行了 7 个采样点的膜层厚度测试,拟合后的膜厚分布结果如图 4 中虚线所示。为了进行数据对比,依照(5)式对均匀性分布数据信息  $W_{\text{hum}}$  进行处理,将面形形式的均匀性数据转换为径向轮廓曲线形式数据,沿元件径向提取原始轮廓曲线结果如图 4 中细实线所示,将  $W_{\text{hum}}$  对应的 Zernike 36 项拟合结果进行数据处理,其轮廓曲线如图 4 中粗实线所示。

计算分析表明,实验结果中 Zernike 36 项拟合结果与反射率计数据拟合结果之间偏差的 RMS 值为 0.057 nm,两者所得到的结果数据基本吻合,验证了基于面形检测方法评估光学元件多层膜均匀性的可行性。

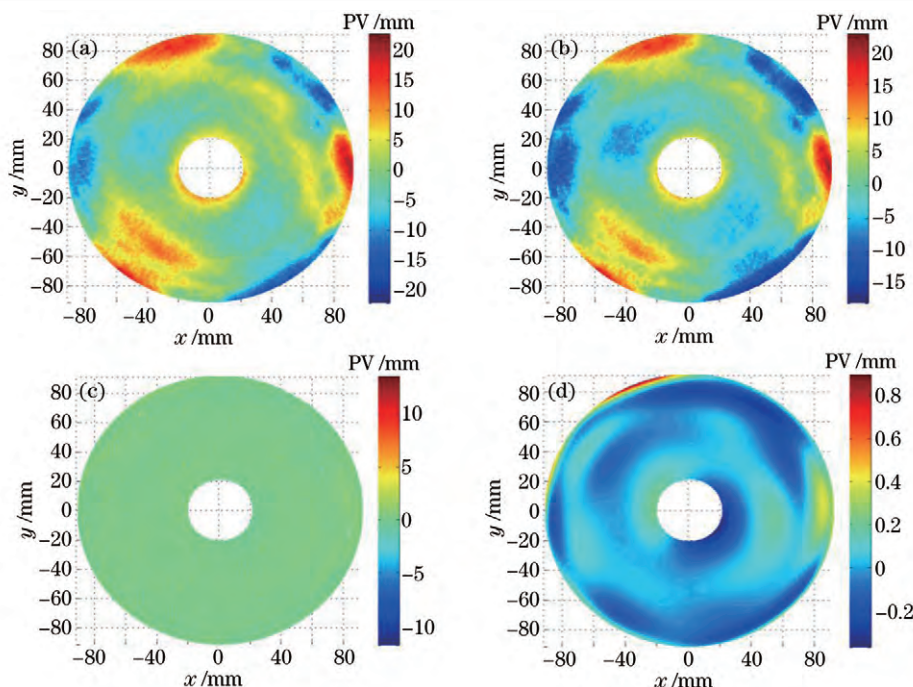


图3 膜厚均匀性测量实验结果。(a) 镀膜前基底面形检测结果; (b) 镀膜后基底面形检测结果; (c) 面形形式膜厚均匀性分布; (d) 均匀性分布的Z36拟合结果

Fig.3 Multilayer thickness uniformity measurement result. (a) Figure measurement result before coating; (b) figure measurement result after coating; (c) uniformity result in form of figure; (d) uniformity result in form of Zernike-36 polynomial

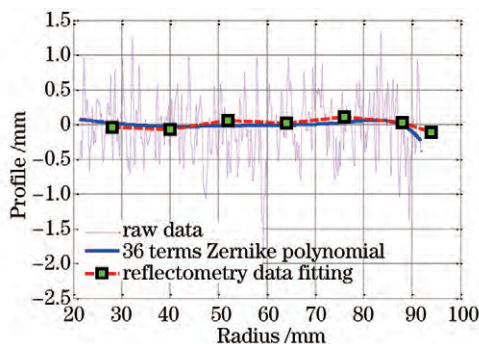


图4 均匀性测试数据对比验证结果

Fig.4 Multilayer thickness uniformity measurement data comparison

## 5 结 论

本文研究了利用面形复现性来评估膜厚均匀性方法的可行性,分析了镀膜前后检测过程中影响面形的主要因素,评估了元件面形检测复现性对测量结果的影响,计算分析了镀膜应力引入的基底面形变化,计算仿真结果表明镀膜应力造成的面形变化绝大部分属于可补偿像差,仿真基底膜层应力对面形误差的实际贡献量RMS值小于60 pm,约占基底面形变化的2%。

构建了高复现性元件面形检测装置,对基于面形检测的多层膜均匀性测量方法进行了实验验证工作,实验结果表明镀膜前后实验基底面形改变量优于0.1 nm(RMS值),将测试结果转化为沿径向的轮廓分布结果,与基于反射率计的膜厚检测数据进行了对比,两者得到的数据偏差RMS值为0.057 nm,表明两方法测试数据基本吻合,验证了采用面形复现性来评估膜厚均匀性方法的可行性。

## 参 考 文 献

- 1 T Miura, K Murakami, K Suzuki, *et al.*. Nikon EUVL development progress update[C]. SPIE, 2010, 6921: 69210M.
- 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 Wang Jun, Jin Chunshui, Wang Liping, *et al.*. Study on the off-axis illumination for extreme ultraviolet lithography[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32 (12): 1211003.  
王 君, 金春水, 王丽萍, 等. 极紫外光刻离轴照明技术研究[J]. 光学学报, 2012, 32 (12): 1211003.
- 6 Wang Hui, Zhou Feng, Wang Liping, *et al.*. Analysis and metrology of reproducibility of high-precision optic mount[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(12): 1208001.  
王 辉, 周 烽, 王丽萍, 等. 高精度光学元件支撑装置面形复现性分析与测量[J]. 中国激光, 2013, 40(12): 1208001.
- 7 Du Yuchan, Li Hailiang, Shi Lina, *et al.*. Integrated development of extreme ultraviolet lithography mask at 32 nm mode[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(10): 1034002.  
杜宇禅, 李海亮, 史丽娜, 等. 32 nm 节点极紫外光刻掩模的集成研制[J]. 光学学报, 2013, 33(10): 1034002.
- 8 Cao Zhen, Li Yanqiu, Liu Fei. Manufacturable design of 16~22 nm extreme ultraviolet lithographic objective[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33 (9): 0922005.  
曹 振, 李艳秋, 刘 菲. 16~22 nm 极紫外光刻物镜工程化设计[J]. 光学学报, 2013, 33(9): 0922005.
- 9 F Cerrina, S Bollepalli, M Khan, *et al.*. Image formation in EUV lithography: multilayer and resist properties[J]. Microelectronic Engineering, 2000, 53(1-4): 13–20.
- 10 E Spiller, S L Baker, P B Mirkarimi, *et al.*. High-performance Mo-Si multilayer coatings for extreme-ultraviolet lithography by ion-beam deposition[J]. Appl Opt, 2003, 42(19): 4049–4058.
- 11 R Soufli, R M Hudyma, E Spiller, *et al.*. Sub-diffraction-limited multilayer coatings for the 0.3 numerical aperture micro-exposure tool for extreme ultraviolet lithography[J]. Appl Opt, 2007, 46(18): 3736–3746.
- 12 E Louis, A E Yakshin, T Tsarfati, *et al.*. Nanometer interface and materials control for multilayer EUV-optical applications[J]. Progress in Surface Science, 2011, 86(11–12): 255–294.
- 13 T Foltyn, S Braun, M Moss, *et al.*. Deposition of multilayer mirrors with arbitrary period thickness distributions[C]. SPIE, 2004, 5193: 124–133.
- 14 M Wedowski, J H Underwood, E M Gullikson, *et al.*. High-precision reflectometry of multilayer coatings for extreme ultraviolet lithography[C]. SPIE, 2000, 3997: 83–93.
- 15 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.
- 16 C J Evans, R N Kestner. Test optics error removal [J]. Appl Opt, 1996, 35(7): 1015–1021.
- 17 L L Deck, C J Evans. High performance Fizeau and scanning white-light interferometers for mid-spatial frequency optical testing of free-form optics[C]. SPIE, 2005, 5921: 59210A.
- 18 V I Pinegyn, E N Zubarev, V V Kondratenko, *et al.*. Structure and stressed state of molybdenum layers in Mo/Si multilayers[J]. Thin Solid Films, 2008, 516(10): 2973–2980.
- 19 S A Yulin, T Kuhlmann, T Feigl, *et al.*. Damage-resistant and low stress EUV multilayer mirrors[C]. SPIE, 2001, 4343: 607–614.
- 20 C Montcalm. Reduction of residual stress in extreme ultraviolet Mo/Si multilayer mirrors with post deposition thermal treatments[J]. Opt Eng, 2001, 40(3): 469–477.
- 21 G G Stoney. The tension of metallic films deposited by electrolysis[J]. Proc R Soc Lond Ser A, 1909, 82(533): 172–175.

栏目编辑: 何卓铭