

## 深紫外大口径非球面反射膜的均匀性研究

潘永刚 林兆文 王奔 付秀华

### Film thickness uniformity of deep ultraviolet large aperture aspheric mirror

PAN Yong-gang, LIN Zhao-wen, WANG Ben, FU Xiu-hua

引用本文:

潘永刚, 林兆文, 王奔, 付秀华. 深紫外大口径非球面反射膜的均匀性研究[J]. *中国光学*, 2022, 15(4): 740–746. doi: 10.37188/CO.2022-0005

PAN Yong-gang, LIN Zhao-wen, WANG Ben, FU Xiu-hua. Film thickness uniformity of deep ultraviolet large aperture aspheric mirror[J]. *Chinese Optics*, 2022, 15(4): 740-746. doi: 10.37188/CO.2022-0005

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/CO.2022-0005>

---

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 一种针对超大口径凸非球面的面形检测方法

Surface testing method for ultra-large convex aspheric surfaces

中国光学. 2019, 12(5): 1147 <https://doi.org/10.3788/CO.20191205.1147>

#### 大口径衍射望远系统初始结构研究

Initial structure of large aperture diffractive telescope

中国光学. 2019, 12(6): 1395 <https://doi.org/10.3788/CO.20191206.1395>

#### 大相对孔径紫外成像仪光学系统设计

Design of large aperture ultraviolet optical system for ultraviolet camera

中国光学. 2018, 11(2): 212 <https://doi.org/10.3788/CO.20181102.0212>

#### 采用五棱镜扫描法检测大口径平面镜的面形

Surface shape measurement of large flat mirrors using a scanning pentaprism method

中国光学. 2019, 12(4): 920 <https://doi.org/10.3788/CO.20191204.0920>

#### 大口径光学合成孔径成像技术发展现状

Review on optical synthetic aperture imaging technique

中国光学. 2017, 10(1): 25 <https://doi.org/10.3788/CO.20171001.0025>

#### 非零位凸非球面子孔径拼接检测技术研究

Research on non-null convex aspherical sub-aperture stitching detection technology

中国光学. 2018, 11(5): 798 <https://doi.org/10.3788/CO.20181105.0798>

文章编号 2095-1531(2022)04-0740-07

## 深紫外大口径非球面反射膜的均匀性研究

潘永刚<sup>1</sup>, 林兆文<sup>1\*</sup>, 王奔<sup>1,3</sup>, 付秀华<sup>1,2</sup>

1. 长春理工大学中山研究院, 广东 中山 528437;
2. 长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022;
3. 中山吉联光电科技有限公司, 广东 中山 528437)

**摘要:**膜厚均匀性作为高精度光学薄膜的重要参数,对光学薄膜的性能起到至关重要的作用,特别是大尺寸高精度反射膜,对膜厚均匀性的要求极高。本文通过研究蒸发源的发射特性与膜厚分布,结合 Mathcad 软件建立精准数学及物理模型,编写自动程序,模拟修正挡板形状,极大地提高了薄膜制备均匀性修正的效率与准确性。通过该方法,在公自转行星蒸发沉积设备上制备了直径为 320 mm 的非球面深紫外反射镜,在紫外(240~300 nm)波段平均反射率大于 97.5%,均匀性优于 0.5%。本研究对大口径非球面薄膜的均匀性修正提供了理论基础与技术支持。

**关键词:**薄膜;均匀性;修正挡板;大口径;非球面

中图分类号:O436 文献标志码:A doi:10.37188/CO.2022-0005

## Film thickness uniformity of deep ultraviolet large aperture aspheric mirror

PAN Yong-gang<sup>1</sup>, LIN Zhao-wen<sup>1\*</sup>, WANG Ben<sup>1,3</sup>, FU Xiu-hua<sup>1,2</sup>

1. Zhongshan Institute of Changchun University of Science and Technology, Zhongshan 528437, China;
2. School of Optoelectronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China;
3. Zhongshan Gilion Optoelectronics Technology Co., Ltd., Zhongshan 528437, China)

\* Corresponding author, E-mail: lzw\_optics@126.com

**Abstract:** As an important parameter of high-precision optical films, thickness uniformity plays a vital role in their performance. Large-size high-precision reflective films have especially high requirements for thickness uniformity. In this paper, the efficiency and accuracy of the uniformity correction of thin films are greatly improved by studying the emission characteristics and film thickness distribution of the evaporation source, combining Mathcad software to establish precise mathematical and physical models, writing automatic programs, and simulating the correcting mask shape. Through this method, an aspherical deep ultraviolet reflector with a diameter of 320 mm is prepared on public autobiographical planetary evaporation deposition equipment. The average reflectance at 240–300 nm ultraviolet waveband is greater than 97.5%, and the uniformity is better than 0.5%. This research provides a theoretical basis and technical support for the uniformity correc-

收稿日期:2022-01-06; 修订日期:2022-02-17

基金项目:吉林省科技发展计划项目(No. 20190302095GX)

Supported by Jilin Province Science and Technology Development Plan Project(No. 20190302095GX)

tion of large aperture aspheric films.

**Key words:** thin film; uniformity; mask; large aperture; aspheric

## 1 引言

光刻技术推动着现代微电子技术的发展, 光刻曝光光学系统以摩尔定律的速度不断刷新分辨率记录, 而深紫外光刻机技术的瓶颈极大地限制了其发展<sup>[1-6]</sup>。深紫外光刻机的投影物镜通常包含 20~30 套超高精度的非球面镜片, 每套镜片的透过率或反射率降低 0.1%, 就会严重影响光刻机的整体性能<sup>[7-9]</sup>。特别是如果反射镜均匀性不好, 导致不同位置反射率不同, 就会急剧增加光刻误差, 因此沉积高均匀性、高质量的大口径非球面反射膜成为了研究热点。膜厚均匀性是膜层厚度在基板表面位置变化的分布, 主要受蒸发源和基板的距离以及蒸发源蒸汽特性的影响, 如果膜厚不均匀, 则对薄膜特性有严重的影响<sup>[10-12]</sup>。

电子束蒸发沉积 (Electron Beam evaporation, EB) 系统是当前应用最广的大尺寸高反膜沉积方法<sup>[13]</sup>。文献 [14-15] 对膜厚均匀性进行了研究, 旋转工件盘或公自转行星系统能增强膜厚的均匀性, 但是制备大面积高要求的光学薄膜时, 则需要辅助修正挡板来改善膜厚均匀性。大多数做法是将现有公式输入计算机中进行计算, 得出的数值都是近似理论值, 能够模拟规律, 但是无法量化。大多修正挡板都是依据经验设计的, 在优化过程中费时费力, 且精度不高。本文针对公自转行星蒸发沉积设备, 研究了蒸发源的发射特性和设备的机械结构。利用 Mathcad 建立高精度的数学及物理模型, 提出了一种新的挡板设计方法, 极大地提高了薄膜制备均匀性的修正效率与准确性。本文设计的自动修正薄膜均匀性程序, 不仅能够准确地计算不同设备的薄膜均匀性分布, 还创新性地添加了自动优化挡板功能。该程序能够根据不同的设备、材料、工艺条件、基板形状自动生成挡板轮廓图, 对提高大尺寸镜片膜厚均匀性的修正效率和精度具有指导性意义。

## 2 膜厚分布

对于 EB 沉积系统, 蒸发源主要分为 3 种:

向各个方向均匀分布点源、遵循余弦分布的小面源和扩展源<sup>[16]</sup>。实际上, 不存在理想点蒸发源。当源面积相对距离较小或蒸发距离较远时, 源的尺寸可以忽略不计, 将蒸发源等同于服从余弦分布的点源。当源面积相对距离较大, 或蒸发距离较近时, 应考虑到蒸发源的表面积, 等同于扩展源。

对于小面源, 基板上某点的膜厚分布 $t_s$ 可以表示为<sup>[17]</sup>:

$$t_s = \frac{m \cos^n \varphi \cos \theta}{\pi \mu r^2}, \quad (1)$$

式中 $m$ 是材料的总质量,  $r$ 是蒸发距离,  $\varphi$ 是蒸发角,  $\theta$ 投影角,  $\mu$ 是材料密度,  $n$ 表示蒸发特性参数,  $n$ 与蒸发材料、蒸发速率、坩埚形状、蒸发设备的机械结构有关。

对于扩展源, 需要对蒸发源的面积进行积分, 膜厚分布 $t_e$ 为:

$$t_e = \iint_{P(x,y)} \frac{m \cos^n \varphi \cos \theta}{\pi \mu r^2} dx dy, \quad (2)$$

式中 $P(x, y)$ 为蒸发源表面积。

## 3 程序模拟

本文所研究的薄膜沉积设备为公自转行星结构, 如图 1 所示。

行星旋转机构的膜厚更均匀的原因在于其各

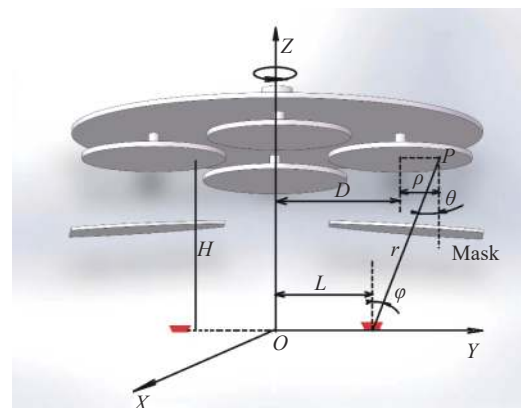


图 1 公自转行星机构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the rotational planetary mechanism

点的运动轨迹基本相同,如图 1 所示,蒸发源平面为  $XOY$  面,公转旋转轴是  $z$  轴,创建三维坐标系。蒸发源距离原点的位置是  $L$ ,蒸发距离是  $r$ ,自转转盘高度是  $H$ ,蒸发角是  $\varphi$ ,投影角是  $\theta$ ,基板上任一点  $P$  与自中心轴的距离是  $\rho$ ,  $t$  是转动时间,主轮公转角速度为  $\omega_1$ ,行星轴自转角速度为  $\omega_2$ ,自转轴到公转主轴的距为  $D$ 。

### 3.1 运动轨迹确定

流程图如图 2 所示,已知蒸发源坐标为  $(0,L,0)$ ,基板任一点  $P$  的运动轨迹与时间  $t$  和转速  $\omega$  有关。按照其几何函数关系可以计算出蒸发距离,蒸发角和投影角,如表 1 所示。

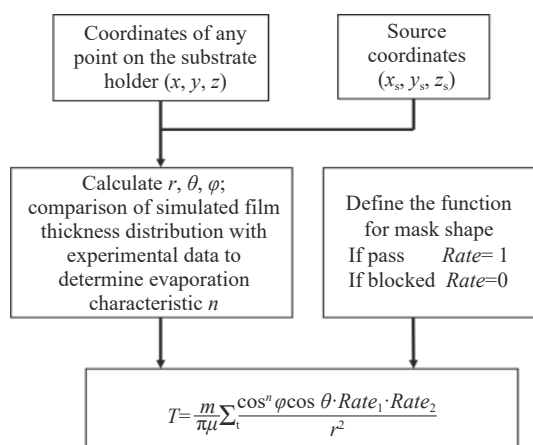


图 2 膜厚模拟程序流程图

Fig. 2 The flow chart of film thickness simulation

表 1 公自转行星结构运动轨迹

Tab. 1 The orbit of revolution of a planetary structure

Geometry	Trajectory
Coordinates of any point on the substrate holder	$x_p = D \sin \omega_1 t + \rho \sin (\omega_1 t + \omega_2 t)$ $y_p = D \cos \omega_1 t + \rho \cos (\omega_1 t + \omega_2 t)$ $z_p = H$
Evaporation distance	$\sqrt{(x_p)^2 + (y_p - L)^2 + (z_p)^2}$
Evaporation angle	$\cos \varphi = \frac{D \cdot \mathbf{PP}_s}{ D   \mathbf{PP}_s }$
Projected angle	$\cos \theta = \frac{D \cdot \mathbf{PP}_s}{ D   \mathbf{PP}_s }$

蒸发源坐标是  $P_s$ , 根据图 2 和表 1 可以得到该机构的相对膜厚分布。

### 3.2 修正挡板设计

不同的挡板形状对蒸发区域遮挡的面积不同,使膜厚相对较薄的部分少遮挡,膜厚相对较厚的部分多遮挡,进而优化膜厚均匀性。设定函数  $Rate$ , 如果该区域未被挡板遮挡则  $Rate=1$ , 否则  $Rate=0$ 。考虑到挡板非水平放置的情况,常规算法无法判定,本文通过进行坐标变换建立模型来

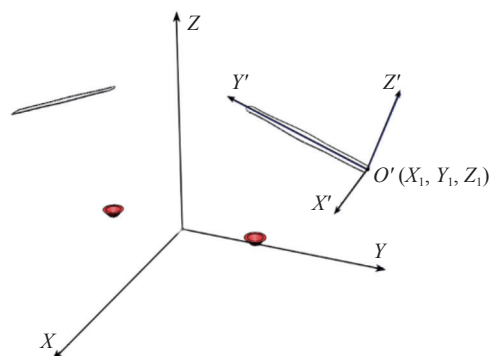


图 3 坐标转换示意图

Fig. 3 The plot of coordinate transformation

解决该难题,如图 3 所示。

将原坐标系平面变换为挡板平面,则基板任一点  $P$  的坐标和蒸发源  $P_s$  的坐标在挡板平面坐标变换后对应的  $P_{new}$  和  $P_{s_{new}}$ , 可表示为:

$$P_{new} = P \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ x_1 & y_1 & z_1 & 1 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} \cos \alpha_z & \sin \alpha_z & 0 & 0 \\ -\sin \alpha_z & \cos \alpha_z & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha_x & \sin \alpha_x & 0 \\ 0 & -\sin \alpha_x & \cos \alpha_x & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (3)$$

$$P_{s_{new}} = P_s \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ x_1 & y_1 & z_1 & 1 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} \cos \alpha_z & \sin \alpha_z & 0 & 0 \\ -\sin \alpha_z & \cos \alpha_z & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha_x & \sin \alpha_x & 0 \\ 0 & -\sin \alpha_x & \cos \alpha_x & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (4)$$

坐标变换后,  $X'O'Z'$  即是挡板所在平面,这样更容易判断  $P_{new}$  与  $P_{s_{new}}$  两点的连线是否穿过新变换后的  $X'O'Z'$ 。

$$\begin{cases} \text{If } 0 < y < y_{top} \cap x_{box} < x < x_{top}, & Rate = 0, \\ \text{Otherwise,} & Rate = 1, \end{cases} \quad (5)$$

其中  $y_{top}$ ,  $x_{box}$  和  $x_{top}$  分别表示在挡板平面坐标内挡板在  $y$  和  $x$  方向上的边界坐标值。

对时间  $t$  叠加求和得到膜厚表达式:

$$T = \frac{m}{\pi \mu} \sum_t \frac{\cos^n \varphi \cos \theta \cdot Rate_1 \cdot Rate_2}{r^2}, \quad (6)$$

时间间隔取 0.000 01 s/次。

### 3.3 蒸发特性确定

该实验使用的设备为光驰 OTFC1300, 蒸发系统配有双电子枪、真空系统使用低温泵、干泵组成无油系统, 辅助系统配有射频离子源, 膜厚控制系统配 Inficon 晶控系统, 设备真空室布局及尺寸如图 4 所示。

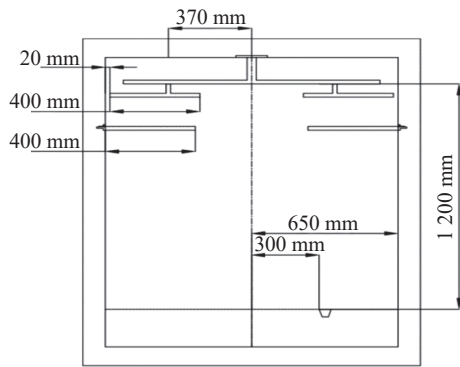


图 4 OTFC-1300 公自转行星设备示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the OTFC-1300 revolution planetary instrument

首先在无挡板状态下分别沉积一层 700 nm 的  $\text{HfO}_2$  和  $\text{SiO}_2$  薄膜, 利用 Macleod 模拟材料的蒸发特性  $n$ 。厚度用相对膜厚表示, 相对膜厚是指基板上任意一点的厚度与旋转子轴中心点膜厚的比值。如图 5 所示,  $\text{HfO}_2$  最佳的  $n$  值为  $n=2.37$ ,

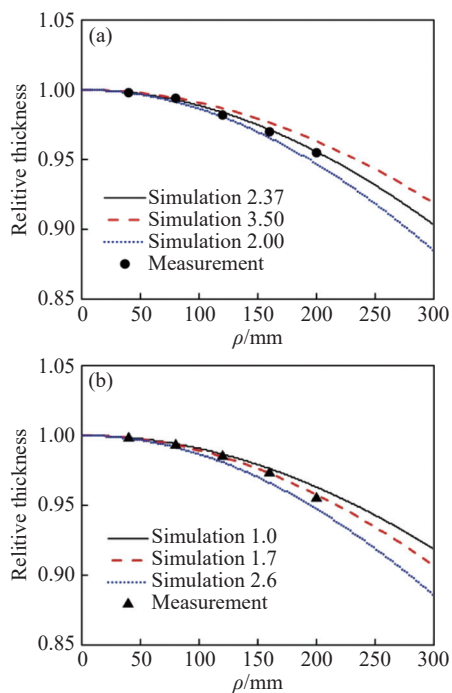


图 5 (a)  $\text{HfO}_2$  和 (b)  $\text{SiO}_2$  的相对膜厚分布

Fig. 5 The relative film thickness distributions of (a)  $\text{HfO}_2$  and (b)  $\text{SiO}_2$

$\text{SiO}_2$  最佳的值为  $n=1.7$ 。(工艺条件与制备镜片相同)

## 4 反射镜的制备及验证

深紫外大口径非球面反射镜的技术参数如表 2 所示。大口径反射镜不只对反射率要求较高, 对膜厚均匀性同样有着极高的要求, 光刻机使用的紫外大口径非球面反射镜要求膜厚均匀性优于 0.5%。

表 2 大尺寸非球面反射镜技术参数

Tab. 2 The technical parameters of the large aspherical mirror

Parameters	Indicators
Substrate	JGS1
Angle of incidence /( $^\circ$ )	0
Spectral range /nm	230~300
Reflectance	$\geq 97.5\%$
Heterogeneity	$\leq 0.5\%$

### 4.1 均匀性修正

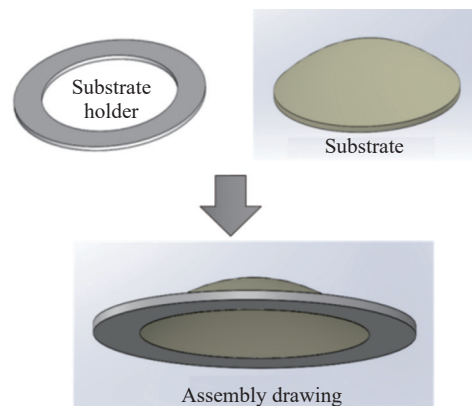
镜片装夹方式如图 6(a)所示, 由于大尺寸非球面镜片很难直接测量镜片上各个区域的反射率, 需要利用陪镀片测量, 然而加工非球面夹具难度太大, 该镜片旋转对称, 所以加工符合非球面截面方程的长方条夹持陪镀片即可验证均匀性, 如图 6(b)所示, 装夹 10 个陪镀片, 验证其均匀性。

镜片的非球面方程为

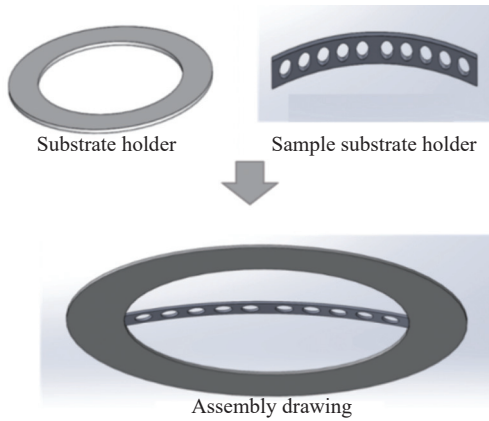
$$z = \frac{c^2 x}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2 x^2}}, \quad (7)$$

式中:  $c=-0.00078836996$ ,  $k=-0.9955 \pm 0.001$ 。

将非球面方程 (7) 代入表 1 进行联合求解, 利用程序模拟出挡板形状, 如图 7 所示。



(a) 实际镜片装夹图  
(a) The clip diagram of actual mirror



(b) 陪镀样品装夹图  
(b) The clip diagram of coplating sample

图 6 装夹示意图

Fig. 6 The clip diagram

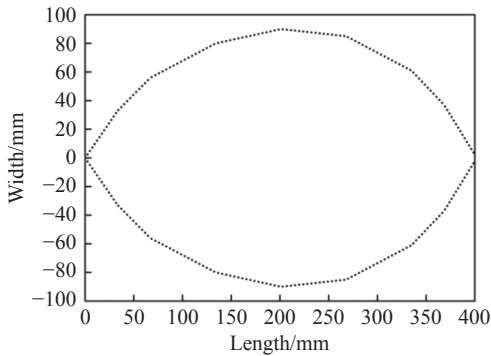


图 7 挡板形状示意图

Fig. 7 The sketch of the baffle shape

4.2 薄膜制备

根据反射镜的指标要求, 金属膜达不到反射率要求, 所以选介质材料  $\text{HfO}_2$  和  $\text{SiO}_2$  作为高低折射率材料制备薄膜, 膜系设计如图 8 所示。

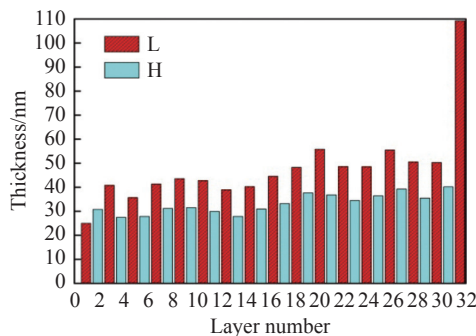


图 8 薄膜厚度分布

Fig. 8 The film thickness distribution

由于  $\text{HfO}_2$  材料受热后晶体方向会发生变化, 致使应力较大并且蒸发过程中容易喷溅, 因而在未全部融化的情况下沉积薄膜, 会产生节瘤, 而用 Hf 充  $\text{O}_2$  镀制的  $\text{HfO}_2$  薄膜, 具备节瘤少、应力

小的优点<sup>[13]</sup>, 所以实验采用 99.95% 纯度的金属 Hf 作为原材料沉积  $\text{HfO}_2$  薄膜, 具体工艺参数如表 3 所示。

表 3 薄膜制备工艺参数

Tab. 3 The process parameters of thin film preparation

Material	Ion source voltage /V	Ion source current /mA	Ion source $\text{O}_2$ gas flow /ml·min <sup>-1</sup>	$\text{O}_2$ gas flow /ml·min <sup>-1</sup>	Substrate temperature /°C	Deposition rate /nm·s <sup>-1</sup>
$\text{HfO}_2$	500	400	50	50	200	0.12
$\text{SiO}_2$	500	400	50	0	200	0.8

最终制备的薄膜使用 Cary7000 分光光度计测试绝对反射率, 光谱曲线如图 9(彩图见期刊电子版)所示, 230~300 nm 平均反射率为 98.3%, 测量不同位置的 10 个陪镀片, 均匀性误差为 0.37%, 满足技术参数要求。均匀性误差定义为对应点的漂移变化量除以对应点的波长, 计算时采用波长 243 nm 处波峰漂移数据计算。

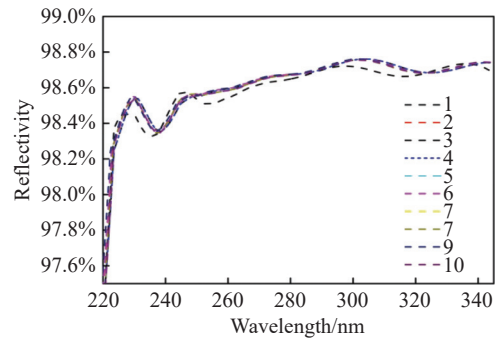


图 9 实际测试光谱曲线

Fig. 9 Actual tested spectral curves

制备的深紫外大口径非球面反射镜面型如图 10(彩图见期刊电子版)所示,  $P_v$  为  $0.344\lambda$ ,

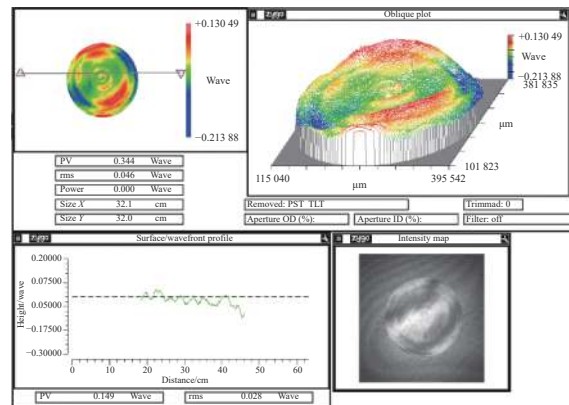


图 10 反射镜表面面型数据图

Fig. 10 The surface topography data of the mirror

RMS 为  $0.046\lambda$ , 测试波长为 632.8 nm, 满足技术参数要求。

## 5 结 论

本文利用 MathCad 编写自动模拟挡板形状

的程序,提高了大尺寸非球面薄膜均匀性修正的效率与精准度,将深紫外大口径非球面反射膜的均匀性提高到 0.5%,制备了高精度的大尺寸反射镜,接下来需要继续增加程序的功能性,将薄膜折射率的非均质性与薄膜的厚度均匀性相结合进行研究。

## 参考文献:

- [1] 彭祎帆,袁波,曹向群.光刻机技术现状及发展趋势[J].光学仪器,2010,32(4):80-85.  
PENG Y F, YUAN B, CAO X Q. Technical status and developing trend of lithographic tools[J]. *Optical Instruments*, 2010, 32(4): 80-85. (in Chinese)
- [2] 程伟林,张方,林栋梁,等.光刻机照明光场均匀性高精度校正方法研究[J].光学学报,2018,38(7):0722001.  
CHENG W L, ZHANG F, LIN D L, et al.. High precision correction method of illumination field uniformity for photolithography illumination system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(7): 0722001. (in Chinese)
- [3] 秦朗.半导体芯片制造过程中的关键——光刻技术[J].数码设计,2019,8(7):99.  
QIN L. The key to the manufacturing process of semiconductor chips——lithography[J]. *Peak Data Science*, 2019, 8(7): 99. (in Chinese)
- [4] 王晓洋,刘丽娟.深紫外非线性光学晶体及全固态深紫外相干光源研究进展[J].中国光学,2020,13(3):427-441.  
WANG X Y, LIU L J. Research progress of deep-UV nonlinear optical crystals and all-solid-state deep-UV coherent light sources[J]. *Chinese Optics*, 2020, 13(3): 427-441. (in Chinese)
- [5] 宗楠,胡蔚敏,王志敏,等.激光等离子体13.5nm极紫外光刻光源进展[J].中国光学,2020,13(1):28-42.  
ZONG N, HU W M, WANG ZH M, et al.. Research progress on laser-produced plasma light source for 13.5 nm extreme ultraviolet lithography[J]. *Chinese Optics*, 2020, 13(1): 28-42. (in Chinese)
- [6] 殷长帅,周剑,刘翊,等.声表面波紫外光探测器的研究进展[J].光学精密工程,2020,28(7):1433-1445.  
YIN CH SH, ZHOU J, LIU Y, et al.. Research progress of surface acoustic wave ultraviolet detectors[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2020, 28(7): 1433-1445. (in Chinese)
- [7] 张德福,李显凌,芮大为,等.193nm投影光刻物镜光机系统关键技术研究进展[J].中国科学:技术科学,2017,47(6):565-581.  
ZHANG D F, LI X L, RUI D W, et al.. Key technology progress of optomechanical systems in 193 nm projection objective[J]. *SCIENTIA SINICA Technologica*, 2017, 47(6): 565-581. (in Chinese)
- [8] 甘雨,张方,朱思羽,等.光刻机照明系统光瞳特性参数的评估算法[J].中国激光,2019,46(3):0304007.  
GAN Y, ZHANG F, ZHU S Y, et al.. Evaluation algorithm of pupil characteristic parameters in lithography illumination system[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(3): 0304007. (in Chinese)
- [9] 王思雨,周贤建,李青原,等.截止斜率可控的蓝光防护光学薄膜[J].中国光学,2021,14(3):544-551.  
WANG S Y, ZHOU X J, LI Q Y, et al.. Blue-blocking optical thin films with controllable cutoff slope[J]. *Chinese Optics*, 2021, 14(3): 544-551. (in Chinese)
- [10] VILLA F, POMPA O. Emission pattern of real vapor sources in high vacuum: an overview[J]. *Applied Optics*, 1999, 38(4): 695-703.
- [11] 董磊,赵元安,易葵,等.不同类型蒸发源对平面夹具薄膜均匀性的影响[J].强激光与粒子束,2005,17(10):1518-1522.  
DONG L, ZHAO Y A, YI K, et al.. Influence of different kinds of evaporation sources on films uniformity[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2005, 17(10): 1518-1522. (in Chinese)
- [12] 姚玉明,宋宝安,肖传富,等.透明红外硫系薄膜非均匀性检测及影响因素[J].光学精密工程,2020,28(5):1005-1011.  
YAO Y M, SONG B A, XIAO CH F, et al.. Optical non-uniformity test of transparent infrared chalcogenide film and influencing factors[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2020, 28(5): 1005-1011. (in Chinese)
- [13] 付秀华,陈成,胡章贵,等.278 nm全固态激光系统倍频分离膜的研制[J].中国激光,2019,46(12):1203002.  
FU X H, CHEN CH, HU ZH G, et al.. Development of separation film for frequency doubling in 278 nm all-solid-state

- laser system[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(12): 1203002. (in Chinese)
- [14] 李大伟, 陶春先, 李笑, 等. 1064 nm与532 nm激光对电子束蒸发制备的HfO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub>高反膜损伤比较[J]. *强激光与粒子束*, 2008, 20(9): 1457-1460.
- LI D W, TAO CH X, LI X, *et al.*. Comparison of laser induced damage at 1064 nm and 532 nm to high-reflective film fabricated by electron beam evaporation[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2008, 20(9): 1457-1460. (in Chinese)
- [15] VILLA F, MARTÍNEZ A, REGALADO L E. Correction masks for thickness uniformity in large-area thin films[J]. *Applied Optics*, 2000, 39(10): 1602-1610.
- [16] ZHANG Y CH, SONG Q ZH, SUN ZH L. Research on thin film thickness uniformity for deposition of rectangular planar sputtering target[J]. *Physics Procedia*, 2012, 32: 903-913.
- [17] HOLLAND L. *Vacuum Deposition of Thin Films*[M]. London: Chapman and Hall, 1970: 1600-1631.

#### 作者简介:



潘永刚(1987—),男,陕西商洛人,博士,2010年于长春理工大学光电信息工程学院获得学士学位,2013年于长春理工大学光学工程专业获得硕士学位,2017年于长春理工大学光学工程获得博士学位,主要从事光学薄膜和器件方面的研究。E-mail: pyg\_optics@163.com



林兆文(1994—),男,黑龙江双鸭山人,硕士,2016年于长春理工大学光电信息工程学院获得学士学位,2019年于长春理工大学光学工程专业获得硕士学位,主要从事光学薄膜和器件方面的研究。E-mail: lzw\_optics@126.com