

文章编号 1004-924X(2013)11-2757-07

# 基于遮挡矩阵的膜厚修正挡板的设计

张立超<sup>1\*</sup>, 高劲松<sup>2</sup>

- (1. 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;  
2. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所  
中科院光学系统先进制造技术重点实验室, 吉林 长春 130033)

**摘要:**为了在光学元件镀膜过程中精确控制膜厚均匀性,通常需要有针对性地设计并制作膜厚修正挡板。然而,由于基底在真空室内运动方式复杂,实际工作中通常采用多次试验,反复进行局部修正的方法来确定挡板形状。为解决这一问题,本文提出了遮挡矩阵的概念。基于这一概念,提出了膜厚修正挡板的设计方法。通过对挡板进行合理的划分,对膜厚空间分布与挡板形状建立起精确的定量关系,从而可在不需进行事后修正的情况下,准确计算出修正挡板的形状。针对行星夹具,设计并制作了膜厚修正挡板,在 $\varphi 300$  mm的口径上实现了膜厚均匀性的PV值优于0.3%、rms值优于0.1%。这些结果验证了这一方法的有效性,表明该方法满足光学元件镀膜过程中高效、可靠地调整膜厚均匀性的要求。

**关键词:**热蒸发;膜厚控制;膜厚均匀性;行星夹具;修正挡板;遮挡矩阵

**中图分类号:**O484.1 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20132111.2757

## Design of uniformity correction masks based on shadow matrix

ZHANG Li-chao<sup>1\*</sup>, GAO Jin-song<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. Key Laboratory of Optical System Advanced Manufacturing Technology, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

\* Corresponding author, E-mail: lichaod@aliyun.com

**Abstract:** To control the thickness distribution accurately in optical coatings for optical elements, correction masks should be designed according to details of coating machines and substrates. However, the shapes of correction masks are hard to predict for restrictions from many factors. Normally, a laborious method is used to correct masks by slightly adjusting their shapes repeatedly. To solve this problem, the concept of the shadow matrix was proposed. Based on this concept, a design method of correction masks for coating thickness was proposed. The relation between thickness distribution and mask shape was established based on partitioning of the mask reasonably. Therefore, mask shapes could be derived without additional mending processes. A uniformity mask was designed and manufactured for a planetary fixture by using this method. Experiments show that the measured uniformity is better than 0.3% PV or 0.1% rms on the range of  $\varphi 300$  mm. The results prove the validity of this

收稿日期:2012-09-07;修订日期:2012-09-27.

基金项目:国家科技重大专项资助项目

method and indicate that it can meet the requirement of optical elements in coating processing for adjusting thickness uniformity in higher efficiency and reliability.

**Key words:** thermal evaporation; coating thickness control; thickness uniformity; planetary fixture; correction mask; shadow matrix

## 1 引言

对于高性能光学薄膜来说,除对光谱性能及应用环境等指标有要求外<sup>[1-2]</sup>,膜厚空间分布的均匀性也是热蒸发镀膜方法一个非常重要的问题。在常规热蒸发镀膜过程中,镀膜材料由蒸发源向各方向发散,使镀膜基底各点处获得不同的厚度。为了获得均匀的膜厚空间分布,人们付出了大量的努力:一方面,通过考察镀膜机结构参数对膜厚均匀性的影响,力求获得优化的沉积系统设计,以满足更高的均匀性要求<sup>[3-6]</sup>;另一方面,不断改进镀膜夹具的形式,从最初仅有一个旋转轴的公转夹具,到公转与自转相结合的行星夹具,力求通过镀膜基底的运动方式来实现各点膜厚均化的效果<sup>[7-8]</sup>。即使这样,所获得的膜厚均匀性仍难以令人满意。在这种情况下,需要加入膜厚修正挡板,以对膜厚空间分布进行进一步的校正<sup>[9-12]</sup>。

如何根据膜厚控制的需要设计并制作合适的修正挡板,一直是热蒸发镀膜亟待解决的问题。对于行星夹具来说,其公转与自转相结合的运动方式会使基底的运动轨迹及其引起的膜厚分布难以把握<sup>[12]</sup>。虽然人们提出了一些设计修正挡板的方法<sup>[13]</sup>,但由于挡板与其产生的实际遮挡效果并不是简单的一一对应关系,因此并不能完全解决挡板的设计问题。目前,均匀性挡板的制作仍然是一个需要依靠经验对已有挡板进行反复局部修补的费时费力的过程,甚至有部分研究者认为根本就无法由理论设计得到修正性挡板<sup>[14]</sup>。

针对上述问题,本文提出了膜厚均匀性挡板的设计方法。该方法基于修正挡板对基底的遮挡矩阵,通过该矩阵将膜厚径向遮挡量与挡板的遮挡角建立起直接的定量关系,这样只需采用膜厚空间分布的仿真程序计算出遮挡矩阵和所需遮挡量,就能够直接计算出符合要求的修正挡板形状。该方法无需对挡板反复进行局部修正就能够满足

膜厚均匀性要求,符合光学元件镀膜对膜厚均匀性调整的高效性与可靠性要求。

## 2 遮挡矩阵的定义与挡板设计方法

行星夹具如图 1 所示,本文对它进行了均匀性修正挡板的设计。

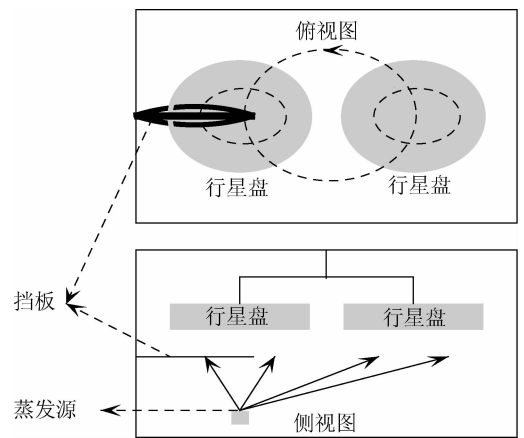


图 1 行星夹具配置示意图

Fig. 1 Diagram of planetary fixture setting

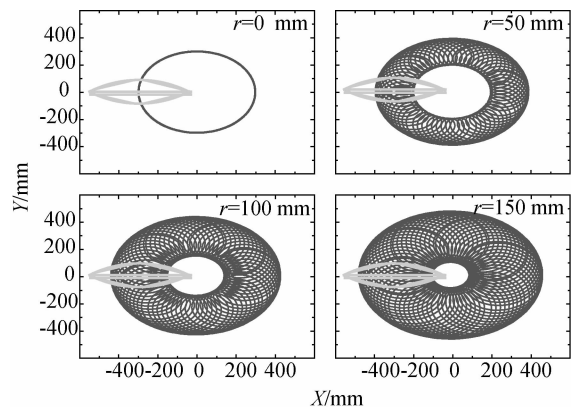


图 2 不同径向位置点的运动轨迹(俯视图)

Fig. 2 Trajectories of different radius positions (top view)

当镀膜基底被固定于行星盘夹具上时,其径向上的各点在公转与自转结合的运动过程中形成了复杂的运动轨迹。图 2 给出了基底与中心位置

径向距离  $r$  的不同点在运动过程中向挡板所在平面投影所形成的轨迹线。图中浅色阴影代表挡板,四幅图中深色细线分别为距基片中心 0, 50, 100, 150 mm 处点的轨迹。这些轨迹线所形成的图案近似为同心圆环的形状(当蒸发源不在公转轴上时,图案会偏离同心圆环而产生一定的畸变),圆环面积随  $r$  值的增加而增大。图中浅色叶片状区域为膜厚修正挡板。从这里可以看出两点规律:一方面,挡板对基底的遮挡并不是一一对应的关系, $r$  值越大,挡板上实际能够对基底产生有效遮挡的区域就越大;另一方面,对基底上处于某一  $r$  值的点来说,描述挡板对其产生的实际效果,应按照迹线的形状对挡板进行弧形分区。

由上述分析可知,挡板各部分与基底上不同  $r$  值的点获得的实际遮挡效果之间,并不是一一对应的关系,而是一种多对多的映射。在这种情况下,为明确挡板形状与实际遮挡效果之间的关系,可定义遮挡量行列式  $S$ 、遮挡矩阵  $A$  和遮挡角行列式  $\alpha$ ,它们之间的关系如下:

$$\begin{pmatrix} S_1 \\ S_2 \\ \dots \\ S_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_{11} & A_{21} & \dots & A_{n1} \\ A_{12} & \dots & \dots & A_{n2} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ A_{1n} & \dots & \dots & A_{mn} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \dots \\ \alpha_n \end{pmatrix}. \quad (1)$$

式(1)的具体含义为:将基底按照  $r$  值大小分为  $n$  个区域,编号分别为  $1, 2, \dots, n$ ,覆盖区域分别为  $r$  值在  $[0, r_{\max}/2(n-1)]$ 、 $[r_{\max}/2(n-1), 3r_{\max}/2(n-1)]$ 、 $[3r_{\max}/2(n-1), 5r_{\max}/2(n-1)]$ , $\dots$ , $[(2n-3)r_{\max}/2(n-1), (2n-1)r_{\max}/2(n-1)]$  之间的同心圆环;同时将挡板平面以公转中心为圆心,按照离圆心距离  $R$  值的大小等分成  $(2n-1)$  块,分别编号为  $-(n-1), -(n-2), \dots, -1, 0, 1, 2, \dots, n-1$ 。其中, $\pm 1, \pm 2, \dots, \pm n$  分别视为一个整体,重新编号为  $1, 2, \dots, n$ 。以挡板对称轴出发、以公转中心为圆心,对不同编号的同心圆环进行扇形切割,每个挡板块对应的扇形夹角为  $(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n)$ 。在上述定义下,基底分为  $n$  个区,挡板分为  $n$  块,两两配对组成  $(n \times n)$  的遮挡矩阵  $A$ ,其中每一个元素  $A_{ij}$  代表第  $i$  号挡板块对第  $j$  号基底区的遮挡效果;基底上每个区获得的实际遮挡量为  $(S_1, S_2, \dots, S_n)$ 。

如果逆推式(1),为获得均匀的膜厚分布,需要首先知道没有挡板时的膜厚径向分布,以确定

需要补足的遮挡量  $S$ 。在知道遮挡矩阵  $A$  的情况下,即可求出每一挡板块的夹角  $\alpha$ ,为:

$$\begin{pmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \dots \\ \alpha_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_{11} & A_{21} & \dots & A_{n1} \\ A_{12} & \dots & \dots & A_{n2} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ A_{1n} & \dots & \dots & A_{mn} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} S_1 \\ S_2 \\ \dots \\ S_n \end{pmatrix}. \quad (2)$$

利用式(2)给出的各块挡板的  $\alpha$  值,就可以直接确定挡板的形状。

### 3 遮挡矩阵计算

由以上分析可知,膜厚修正挡板设计的关键在于确定遮挡矩阵。确定遮挡矩阵的方法有两种。一种是从实验中获得。实验进行  $n$  次,每一次采用不同形状的挡板,即通过改变的  $\alpha$  获得不同的遮挡量  $S$ 。这样,由实测得到的遮挡量  $S$ ,利用式(1)的变化形式:

$$\begin{pmatrix} A_{11} & A_{21} & \dots & A_{n1} \\ A_{12} & \dots & \dots & A_{n2} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ A_{1n} & \dots & \dots & A_{mn} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_{11} & S_{21} & \dots & S_{n1} \\ S_{12} & \dots & \dots & S_{n2} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ S_{1n} & \dots & \dots & S_{mn} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \alpha_{11} & \alpha_{21} & \dots & \alpha_{n1} \\ \alpha_{12} & \dots & \dots & \alpha_{n2} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \alpha_{1n} & \dots & \dots & \alpha_{mn} \end{pmatrix}^{-1}, \quad (3)$$

就可以求出遮挡矩阵  $A$ 。但这种方法效率太低,在成本上也极不经济,并不值得推荐。

另一种是采用理论模拟的方法,通过计算获得遮挡矩阵的各元素。为了计算遮挡矩阵,开发了膜厚均匀性仿真计算程序。该程序的计算建立在下面 3 个假定成立的前提下<sup>[15]</sup>:

- (1)蒸发分子与蒸发分子、蒸发分子与残余气体之间没有碰撞;
- (2)蒸发分子到达基底表面后全部沉积成致密的薄膜,其密度与块状材料相同;
- (3)蒸发源的蒸气发射特性不随时间变化。

在以上假定条件下,基底上某一点处的瞬时膜厚可以表示为:

$$d_p = C \frac{\cos^n \varphi \cos \theta}{r^2}, \quad (4)$$

其中: $C$  为常数; $r$  是  $p$  点到蒸发源的瞬时距离; $\varphi$  是蒸发源表面法线与  $p$  点和蒸发源连线的夹角;

$n$  是用于描述蒸发源蒸发特性的参数,由材料而定; $\theta$  是  $p$  点法线与  $p$  点和蒸发源连线的夹角。

由图 2 可知,对于行星夹具来说,基底上的点在镀膜时的运动轨迹比较复杂,同时夹角  $\varphi$  和  $\theta$  也在不断改变。如果采用通常的积分式处理方法计算式(4)<sup>[2-4]</sup>,会使分析过程和公式的推导过程变得复杂,从而极大地增加了编程的难度。因此,本文将问题简化,直接对公式(4)进行计算而不是采用积分方法处理。具体做法如下:直接将沉积时间  $t$  等分为若干个微元  $\Delta t_i$ ,在每个时间微元内按照式(4)计算基底不同径向距离  $r$  处的瞬时沉积厚度  $\Delta d_i(r)$ ,然后将每一径向距离的点在各时间微元内的厚度求和,再对时间微元总数  $k$  取平均,得到不同径向距离在时间  $t$  内的平均沉积速率:

$$v(r) = d(r)/k = \sum_{j=1}^k \Delta d_j(r)/k. \quad (5)$$

这一沉积速率由于包含常数  $C$ ,并不代表沉积速率的绝对数值;但由于含有相同的常数项,可以直接相除获得径向平均沉积速率的分布,或径向膜厚的分布,其数值为  $v(r)/v(0)$ 。

基于以上介绍可知,这种模拟方法的准确性取决于对沉积时间  $t$  的划分。在划分微元总数  $k$  足够多的情况下,即使运动点的运动轨迹比较复杂,也能够以合适的几率遍历所有可能的点,形成和积分计算相同的效果。

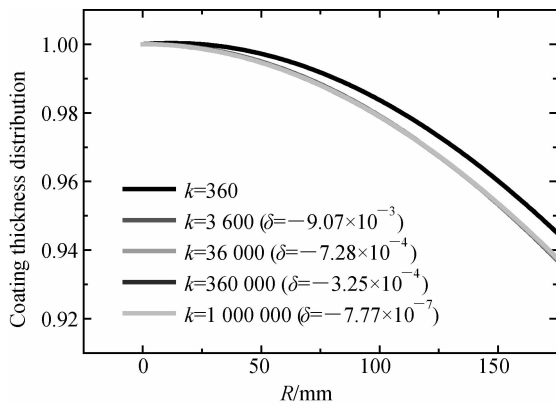


图 3 膜厚径向分布计算结果的收敛情况

Fig. 3 Convergence of calculated coating thickness distribution

图 3 显示了在时间微元数增加的情况下,计算得到的膜厚径向分布的收敛情况。按照图 1 中的行星夹具结构布局,以行星盘中心为基准点,当行星盘围绕镀膜机中轴线每运动  $1^\circ$  时设置一个

时间微元。图 3 中的不同曲线为微元数不同的情况,其中  $\delta$  用于表示不同微元数所对应的收敛误差。比如  $k=3\ 600$  对应的收敛误差  $\delta=9.07 \times 10^{-3}$ ,其含义为  $k=3\ 600$  和  $k=360$  两种情况下分别计算得到的膜厚差值在整个计算口径内的最大值。从中可以看出,在  $k$  取值足够大的情况下,收敛误差逐渐减小,比如  $k=1\ 000\ 000$  时, $\delta$  已经降至  $10^{-6}$  以下,这说明计算结果已经获得了足够的精度。

在确定仿真计算结果的准确性后,就可以进行遮挡矩阵的计算。首先,对  $n$  个挡板块中的每一块,分别计算它们对基底上各区域的遮挡量。以  $A_{11}$  为例,它代表 1 号挡板块每变化  $1^\circ$  的情况下,对基底的 1 号区产生遮挡量的改变量。在计算程序中,分别将挡板块的角度  $\alpha$  设为  $10, 20, 30^\circ, \dots$ ,得到不同角度下 1 号遮挡块对 1 号区的遮挡量值,然后对这些遮挡量值做线性拟合,获得的斜率即为  $A_{11}$ 。同理可计算得到遮挡矩阵中的其它分量。

## 4 验证实验

为验证上述方法的有效性,本文在 Leybold-SyrusPro1110 镀膜机上进行了实验,镀膜机口径为 1 110 mm,配有 4 个口径为 400 mm 的平面行星盘。挡板与行星盘所在的平面与蒸发源所在平面的垂直距离分别为 750 mm 和 700 mm,蒸发源距行星盘公转轴的距离为 250 mm。实验采用热舟蒸发方式,在 2.54 cm(1 inch)熔石英基底上镀制  $\text{MgF}_2$  单层膜,沿行星盘径向位置 0, 30, 45, 60, 75, 90, 105, 120, 135, 150 mm 放置,对应  $\varphi=300$  mm 的有效镀膜口径,对每个镀膜样品采用 PE1050 分光光度计测试透过率曲线,然后代入 Optilayer 软件拟合出膜厚。

首先在无挡板的情况下进行实验,以确定式(4)中表示蒸发源特性的  $n$  值,结果见图 4。 $n$  值的最佳拟合结果为 1.5。将这一结果结合其它镀膜机结构参数,可以按照前面介绍的方法计算出遮挡矩阵的各分量。从计算效率角度考虑,式(2)中矩阵的秩要尽量小,然而挡板分块过少会使均匀性调节的效果过于粗糙,因此需要合理选择挡板的分块数,以平衡计算量与均匀性调节能力。在本实验中,将挡板分成 6 块,分别对应从行星盘

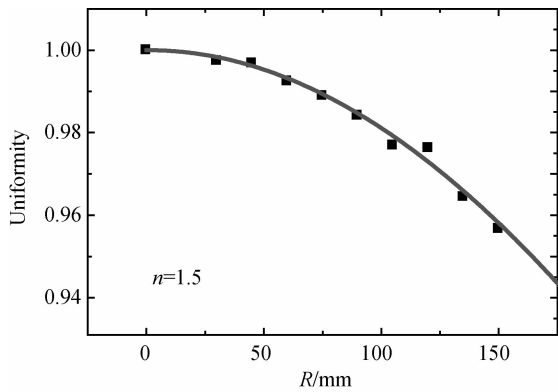


图 4 无挡板时膜厚分布实测与拟合结果

Fig. 4 Experiment and fitting results of thickness distribution without correction masks

中心转动形成的迹线出发,以 30 mm 为间隔向两侧辐射分割出的同心圆环,编号为 1~6 号挡板块,分别对应的调制点为行星盘上距中心 0,30,60,90,120,150 mm 的点。计算得到的遮挡矩阵(注:矩阵中每个元素为单位角度的挡板产生的遮挡量值)为:

$$A = \begin{pmatrix} 2.8 & 1.04 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1.48 & 2.26 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.68 & 1.72 & 1.4 & 0 & 0 & 0 \\ 0.44 & 1 & 1.35 & 1.01 & 0 & 0 \\ 0.35 & 0.74 & 0.83 & 1.18 & 0.73 & 0 \\ 0.3 & 0.59 & 0.64 & 0.71 & 1.08 & 0.53 \end{pmatrix} \times 10^{-3} \quad (6)$$

然后考虑遮挡量。从图 4 中的数据可以确定遮挡量  $S = [4.67\%, 4.49\%, 3.93\%, 2.98\%, 1.66\%, 0]$ 。但是这一数据不能直接带入式(2)进行计算,因为膜厚在整个基片上的分布呈中心厚两边薄的分布,这意味着中心位置的厚度一定需要遮挡才能与边缘持平。从图 2 可知,1 号挡板块不仅会遮挡 1 号区域,同时也会遮挡 2~6 号区域,同样 2 号挡板块也会对 2~6 号区域产生遮挡,其它挡板块均会表现出相同的遮挡方式。因此,在设置遮挡量  $S$  的时候,必须事先预留足够的调整量,否则在用式(2)计算挡板形状时会产生不合理的解。

从表 1 可以看出,未预留调整量时,挡板遮挡角的值会出现负值,显然无法实现;考虑到这一点,将每一区域所需的遮挡量在原来的基础上多预留 10%,此时挡板的遮挡角才得到了合理的解。

表 1 有无预留调整量时遮挡量计算值对比

Tab. 1 Comparison of calculated shadow quantities with and without obligate parts ( $^{\circ}$ )

$\alpha$	$\alpha_1$	$\alpha_2$	$\alpha_3$	$\alpha_4$	$\alpha_5$	$\alpha_6$
无预调量	12.3	11.8	7.6	2.3	-7.4	-17.2
有 10% 的预调量	37.8	39.4	32.8	29.2	17.2	9.8

按照上述计算结果制作了挡板,其形状如图 5 所示,加入挡板后对均匀性的调整结果见图 6。



图 5 计算得到的挡板形状

Fig. 5 Calculated shape of correction mask

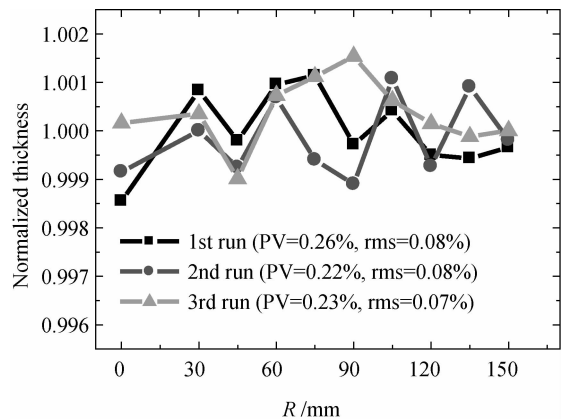


图 6 加入挡板后膜厚均匀性结果

Fig. 6 Thickness distribution with correction mask

加入挡板后对膜厚空间分布进行了测试。实验重复了 3 次,在  $\varphi 300$  mm 的口径上获得的均匀性结果如下:PV(峰谷)值分别为 0.26%,0.22%和 0.23%,rms(均方根)值分别为 0.08%,0.08%和 0.07%。这样的结果验证了均匀性挡板设计方法的有效性。通过预先进行的合理计算,可以避免挡板制作过程的反复修改,实现了高效的膜厚均匀性控制。

## 5 结 论

本文针对采用行星夹具形式的热蒸发镀膜方法中基底运动轨迹复杂、均匀性挡板设计与制作困难且效率较低等问题,提出了遮挡矩阵的概念,并基于这一概念发展了膜厚修正挡板的设计方法。该方法可以在不需事后修正的情况下,准确计算出修正挡板的形状,满足了光学元件镀膜对膜厚均匀性调整的高效性与可靠性要求。针对平面行星夹具,设计并制作了膜厚修正挡板,在  $\varphi 300$  mm 的口径上实现了 PV 值

优于 0.3%、rms 值优于 0.1% 的膜厚均匀性,由此验证了该方法的有效性。

原则上,该方法不仅适用于平面样品,也同样适用于曲面样品;而且特别适合某些元件数量特别多,且每个元件具有不同面形的复杂光学系统镀膜所需要的均匀性调整。在下一步的工作中,会将这一方法应用于曲面光学元件;另一方面,本文中所展示的膜厚控制精度只是一个初步结果,如果在进一步提升计算能力的基础上,对挡板与基片分块再分得精细一些,锯齿形的尺寸会更小、更趋近流线型,这样厚度控制误差将更小,从而满足更高的膜厚控制精度要求。

## 参考文献:

- [1] 曲峰,朱华新,刘桂林,等. 基于 ZF6 基底的可见光宽谱带高性能增透膜[J]. 中国光学,2013,6(4): 551-556.  
QU F, ZHU H X, LIU G L, *et al.*. Wideband and high performance anti-reflection coatings in visible light spectrum based on ZF6 substrate [J]. *Chinese Optics.*, 2013,6(4):551-556. (in Chinese)
- [2] 杨道奇,付秀华,耿似玉,等. 0.6~1.55  $\mu\text{m}$  可见/近红外超宽谱增透膜的研制[J]. 中国光学,2012,5(3):270-276.  
YANG D Q, FU X H, GENG S Y, *et al.*. Design and fabrication of 0.6~1.55  $\mu\text{m}$  visible/near infrared ultra-broad antireflection coatings [J]. *Chinese Optics.*, 2012,5(3):270-276. (in Chinese)
- [3] BOSCH S. Lens coating in thermal evaporation physical vapour deposition chambers optimization of the geometrical configuration [J]. *J. Phys. D.*, 1993, 26(10): 124-129.
- [4] ABZALOVA G I, SABIROV R S, MIKHAILOV, *et al.*. Depositing uniform-thickness coatings on large surfaces by means of electron-beam evaporation in vacuum [J]. *J. Opt. Technol.*, 2005, 72(10): 799-801.
- [5] 潘栋梁,熊胜明,张云洞,等. 大口径镀膜机膜厚均匀性分析[J]. 应用光学,2001,22(1):33-38.  
PAN D L, XIONG SH M, ZHANG Y D, *et al.*. Film uniformity calculation of large caliber coating machine [J]. *J. Appl. Opt.*, 2001,22(1):33-38. (in Chinese)
- [6] 方明,范正修,黄建兵. 平面行星夹具的物理气相沉积均匀性计算[J]. 计算物理,2006,23(6):738-742.  
FANG M, FAN ZH X, HUANG J B. Numerical simulation of a flat planetary fixture for physical vapor deposition [J]. *Chin. J. Comput. Phys.*, 2006,23(6):738-742. (in Chinese)
- [7] OLIVER J, TALBOT D. Optimization of deposition uniformity for large-aperture national ignition facility substrates in a planetary rotation system [J]. *Appl. Opt.*, 2006, 45(13): 3097-3105.
- [8] 潘栋梁,熊胜明,张云洞,等. 行星夹具膜厚均匀性计算[J]. 强激光与粒子束,2000,12(3):277-280.  
PAN D L, XIONG SH M, ZHANG Y D, *et al.*. Film uniformity calculation of large caliber coating machine [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2000,12(3):277-280. (in Chinese)
- [9] JAING C C. Designs of masks in thickness uniformity[J]. *SPIE*,2010,7655:76551Q.
- [10] LUO J, CHENG S L, MA P. Optimization of deposition uniformity in a planet rotation system with precise mask design [J]. *SPIE*, 2007,6722:67222L.
- [11] 王长军,熊胜明. 大口径光学元件薄膜厚度均匀性修正[J]. 强激光与粒子束,2007,19(7): 1153-1157.  
WANG CH J, XIONG SH M. Correction for film thickness uniformity of large aperture optical components [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2007,19(7):1153-1157. (in Chinese)
- [12] 方明,郑明军,吴明,等. 平面行星夹具均匀性修正挡板设计方法研究[J]. 真空科学与技术学报,2006,26(4):286-289.  
FANG M, ZHENG M J, WU M. Numerical simulation of a flat planetary fixture for physical vapor

deposition [J]. *J. Vac. Sci. Tech.*, 2006,26(4): 286-289. (in Chinese)

- [13] 毕军,易葵,黄建兵,等. 电子束蒸发镀膜膜厚均匀性的修正方法:中国,CN1718844[P]. [2006-01-11] BI J, YI K, HUANG J B, *et al.*. Modification method for thickness uniformity of films in electron beam evaporation: China, CN1718844[P]. [2006-01-11](in Chinese)

[14] WILLEY R. *Practical Design and Production of Optical Thin Films*[M]. New York: Marcel Dekker Inc, 2002.

- [15] 唐晋发,顾培夫,刘旭,等. 现代光学薄膜技术[M]. 杭州:浙江大学出版社,2006. TANG J F, GU P F, LIU X, *et al.*. *Modern Optical Thin Film Technology* [M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2006. (in Chinese)

#### 作者简介:



张立超(1979—),男,吉林省吉林市人,博士,副研究员,2000年,2003年于吉林大学分别获得学士、硕士学位,2007年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事短波光学薄膜技术的研究。E-mail: lichaod@aliyun.com



高劲松(1968—),男,吉林白城人,研究员,博士生导师,1989年于浙江大学获得学士学位,2005年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事光学薄膜与电磁功能薄膜等方面的研究。E-mail: gaojs@ciomp.ac.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)