

# 单一蒸发源膜厚分布的均匀性

付秀华<sup>1</sup>, 赵迪<sup>1\*</sup>, 卢成<sup>2</sup>, 马国俊<sup>1</sup>, 鲍刚华<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022;

<sup>2</sup> 成都国泰真空设备有限公司, 四川 成都 611130

**摘要** 基于非余弦膜厚计算公式, 提出了利用极坐标简化表征膜厚分布的方法, 对单源电子束蒸发的光学薄膜的膜厚均匀性控制进行了研究, 同时对修正板的放置位置进行了计算。相对于传统修正板置于蒸发源正上方的方法, 采用极坐标法计算得到的修正板位置更有利于控制膜厚分布的均匀性。以蒸发 H4 和 MgF<sub>2</sub> 为例, 分别对高、低折射率材料的修正板位置和形状进行计算, 并利用这两种材料分别制备单层膜, 实测光谱均匀性偏差优于 0.3%, 证明了所提方法的正确性与可行性。

**关键词** 薄膜; 光学镀膜; 膜厚均匀性; 修正板

中图分类号 O484

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201939.1231001

## Uniformity of Film Thickness Distribution for Single Evaporation Source

Fu Xiuhua<sup>1</sup>, Zhao Di<sup>1\*</sup>, Lu Cheng<sup>2</sup>, Ma Guojun<sup>1</sup>, Bao Ganghua<sup>2</sup>

<sup>1</sup> School of Optoelectronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China;

<sup>2</sup> Chengdu Guotai Vacuum Equipment Co., Ltd., Chengdu, Sichuan 611130, China

**Abstract** A simplified polar coordinate method based on the non-cosine film thickness formula is proposed for characterizing film thickness distribution. Herein, control of the uniformity of optical film thickness formed by single source electron beam evaporation is studied. Simultaneously, the position of the mask plate is calculated. Compared to the traditional method of placing the mask directly above the evaporation source, the proposed polar coordinate method is used to calculate mask position, which is more conducive to controlling the uniformity of film thickness distribution. Considering an evaporated H4/MgF<sub>2</sub> combination as an example, the mask positions and shapes of high and low refractive index materials are calculated, and single layer films are prepared using these two materials. The measured spectral uniformity deviation is better than 0.3%, thus demonstrating the correctness and feasibility of the proposed method.

**Key words** thin films; optical coating; uniformity of film thickness; mask

**OCIS codes** 310.6860; 310.1620; 310.1860

## 1 引 言

光学薄膜厚度的均匀性是薄膜制备的一项重要指标, 它影响着光学元件的光谱特性, 并决定着能达到要求的实际有效镀膜面积<sup>[1-2]</sup>。同时, 它也是衡量镀膜装置性能的一项重要指标。膜厚均匀性是指在基片不同位置或随着基片位置的改变, 所沉积的膜厚的变化情况<sup>[3]</sup>。对于高精度、高性能的光学系统, 或大口径的光学元件和批量生产的光学元件, 膜厚

的均匀分布至关重要<sup>[4-6]</sup>。

影响膜厚均匀性分布的因素有很多, 例如, 镀膜系统的几何配置、夹具的形状、基片的运动方式、蒸发源的蒸发特性、镀膜工艺等<sup>[7-9]</sup>。镀膜元件对膜厚均匀性精度要求苛刻, 只通过优化上述几个因素并不能满足要求, 此时, 需要添加修正板对膜厚分布进行严格校正<sup>[10-13]</sup>, 这也是真空镀膜中改善膜厚分布均匀性的一种重要方法。

在以往的理论研究和实际生产中, 当涉及到改

收稿日期: 2019-07-01; 修回日期: 2019-08-05; 录用日期: 2019-08-14

基金项目: “十三五”装备预研共用技术和领域基金(414xxxx0202)

\* E-mail: zhaodi9425@163.com

善均匀性分布时,通常会将修正板置于蒸发源的正上方<sup>[14]</sup>。在大多数情况下,光学介质薄膜由交替沉积的高、低折射率膜料组成,而高、低折射率膜料的蒸发特性不同,很难用一块修正板同时改善两种膜料的厚度均匀性。此时,通常采用双蒸发源、双修正板并将修正板置于对应膜料正上方的方法,以改善多层膜的膜厚分布。但在实际应用中,考虑到成本和效率等因素,也存在数量较多的单一蒸发源配置的真空镀膜设备,但很少有文献讨论这种情况下膜厚均匀性的修正方法。

本文基于非余弦膜厚分布理论对膜厚分布进行了研究,分析了修正板位置对均匀性的影响,提出了一种评价修正板位置的数学方法;采用单一蒸发源镀制单层 H<sub>4</sub>、MgF<sub>2</sub> 薄膜实验验证了这一方法。

## 2 理论分析

电子束蒸发的发射特性通常遵循非余弦分布,旋转球面夹具的面源蒸发膜厚公式<sup>[3]</sup>为

$$t = \frac{mh^n [h \cos A + (\rho + L \cos \psi) \sin A]}{\pi\mu (h^2 + \rho^2 + L^2 + 2\rho L \cos \psi)^{(n+3)/2}}, \quad (1)$$

式中: $m$  为蒸发材料的质量; $h$  为  $S$  点距蒸发源的高度;指数  $n$  与蒸发特性有关; $A$  为样品点  $S$  到球面夹具球心点的连线与转轴的夹角; $\rho$  为  $S$  点到转轴的距离; $L$  为蒸发源到转轴的距离; $\psi$  为球面夹具的旋转角度; $\mu$  为蒸发材料的密度。当旋转角度  $\psi = 0^\circ$ , 即样品点  $S$  位于蒸发源正上方平面时, (1) 式中各物理量的关系如图 1 所示。其中  $E$  为蒸发源,  $H$  为球面夹具到蒸发源所在平面的高度,  $R$  为球面夹具的曲率半径,  $\theta$  为蒸发源  $E$  到点  $S$  的连线与点  $S$  到球面夹具球心点连线的夹角,  $\varphi$  为点  $S$  到蒸发源  $E$  的连线与蒸发源蒸发面法线的夹角,  $r$  为样品点  $S$  到蒸发源的距离。

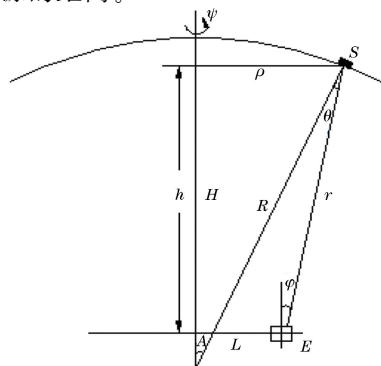


图 1 非余弦膜厚计算的几何示意图

Fig. 1 Geometric diagram of calculation of non-cosine film thickness

(1) 式也可以认为是沉积面上某点的瞬时膜厚公式。对于几何配置固定的真空镀膜机,当蒸镀某膜料时,  $S$  点处的上述参数均为已知量,因此瞬时膜厚  $t$  可以表示为旋转角度  $\psi$  的函数,则(1)式可以表示为

$$t = \frac{a + b \cos \psi}{(c + d \cos \psi)^s}, \quad (2)$$

其中,

$$\begin{cases} a = \frac{mh^n (h \cos A + \rho \sin A)}{\pi\mu} \\ b = \frac{mh^n L \sin A}{\pi\mu} \\ c = h^2 + L^2 + \rho^2 \\ d = 2L\rho \\ s = \frac{n+3}{2} \end{cases} .$$

如果将  $t$  看作极径,  $\psi$  看作极角,那么(2)式可以用极坐标图更直观地进行表述。当  $H = 1.5$  m,  $L = 0.5$  m,  $R = 1.1$  m 时,对于距离中心 0.3 m 的样品,各个位置瞬时膜厚分布的极坐标图如图 2 所示。其中,坐标图中心  $O$  位于蒸发源所在的平面,处于设备的中心位置。当  $\psi = 0^\circ$  时,取  $S$  点位于蒸发源正上方的平面上。为了简化计算,将蒸发材料的质量  $m$  记为 1,并对瞬时膜厚  $t$  进行归一化处理。

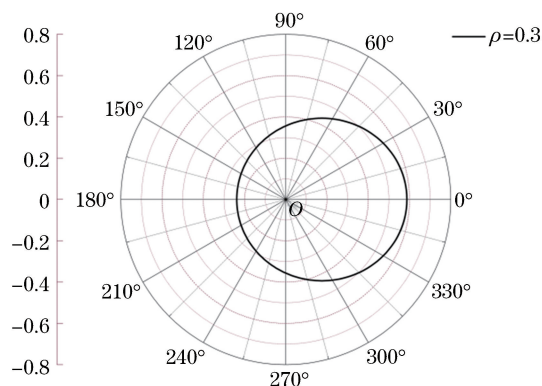


图 2 瞬时膜厚分布的极坐标图示

Fig. 2 Polar coordinate diagram of instantaneous film thickness distribution

对于旋转球面夹具,如果计算  $S$  点旋转一圈后的总膜厚,则需要对(1)式进行积分。按照常规计算方法,计算量大且困难<sup>[5]</sup>。极坐标图可以很清楚地表达该物理意义,可以认为图 2 中曲线所围成的面积正比于  $S$  点旋转一周后沉积的膜厚。

图 3 所示为距离中心不同位置所对应的瞬时膜厚分布。由图 3 可知,样品距离中心位置越远,曲线的极径随极角的变化越明显,瞬时膜厚分布对位置

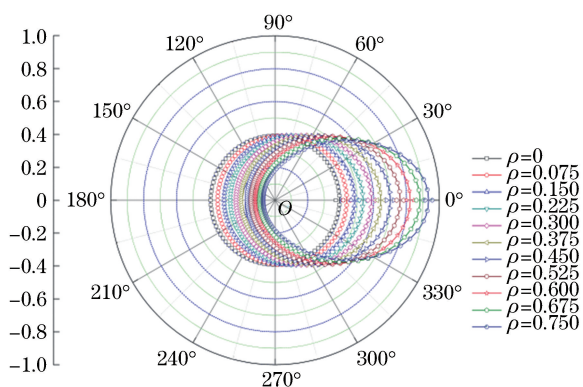


图 3 沉积面上不同位置的瞬时膜厚分布

Fig. 3 Instantaneous film thickness distribution at different locations on deposition surface

的依赖越明显。

对于给定的中心距离  $\rho$ , 可以计算出修正板遮挡的角度范围  $0 \sim \psi_\rho$ , 使得曲线所围成的剩余面积一致, 即有效沉积到基板上的膜厚一致。考虑到膜料利用率的最大化, 令剩余面积等于最小沉积膜厚对应位置的曲线所围成的面积, 即

$$S_{t\rho} - S_{\psi\rho} = S_{t_{\min}}, \quad (3)$$

式中:  $S_{t\rho}$  为距离  $\rho$  处的曲线所围成的面积;  $S_{\psi\rho}$  为距离  $\rho$  处修正板在  $0 \sim \psi_\rho$  角度范围遮挡的曲线所围成的面积;  $S_{t_{\min}}$  为最小沉积膜厚对应位置的曲线所围成的面积。

在常规可见光波段, 增透膜是最常用的一种薄膜, 通常采用交替蒸发 H4、 $MgF_2$  膜料进行制备。对于蒸镀 H4 薄膜, 蒸发特性参数  $n=2.1$  是依据不加修正板时的实验膜厚分布数据与理论计算的膜厚分布数据拟合确定的。按照遮挡法公式, 可以很容易地计算出修正板的形状; 同样, 对于蒸镀  $MgF_2$  薄膜, 蒸发特性参数  $n=2.9$ , 也可以根据遮挡法公式将修正板形状计算出来。图 4 所示为蒸发单一膜料时修正板的计算宽度。由图 4 可知, 两个修正板的形状差异很大, 这说明如果采用单一蒸发源同时蒸发这两种膜料, 单一修正板就无法保证组合光谱的均匀性。

因此, 对于使用两种材料交替镀制的光学薄膜, 需要考虑双修正板修正组合的光谱均匀性。在理想情况下, 一种膜料对应一种修正板, 可以最大程度地保证均匀性。即, 镀制 H4 膜层时用一个修正板, 镀制  $MgF_2$  膜层时用另外一个修正板。在镀膜过程中, 可以通过控制修正板的升降来选择对应的修正板。由此可知, 关键在于寻找到合适的修正板放置位置。传统的做法是将修正板放置于蒸发源的正上方。从图 3 中可以看出, 在蒸发源正上方的曲线密

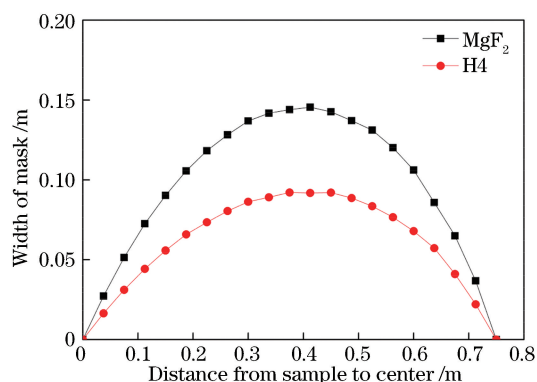


图 4 蒸发单一膜料时修正板的计算宽度

Fig. 4 Computational width of corrected mask when evaporating single film

集度较小, 这意味着此处是膜厚梯度变化最敏感的区域, 膜厚分布对修正板的仰角变化、蒸发源的位置变化、蒸发源蒸镀特性的变化很敏感。分析图 3 中曲线可以得知, 膜厚变化最平缓位置在  $\psi=60^\circ$  和  $\psi=300^\circ$  方向附近, 此时的瞬时膜厚对距离  $\rho$  最不敏感。这表明在修正膜厚时, 在相同的遮挡角度件下, 沿球面夹具分布的方向所遮挡的膜厚最接近, 修正板的修剪效率也会得到提升。可以预测, 对于任意膜料, 膜厚分布都存在这样两个角度, 这也应为修正板放置的位置。

### 3 实验结果与讨论

利用 H4、 $MgF_2$  薄膜进行实验验证。利用非余弦参数计算膜厚分布, 分析梯度最平缓位置处可以发现, 蒸镀 H4 薄膜和  $MgF_2$  薄膜对应的这个角度分别为  $60^\circ$  和  $54.8^\circ$ 。考虑到真空室内的空间及两个修正板的尺寸, 选择在  $60^\circ$  附近安装修正 H4 膜层均匀性的修正板, 在  $54.8^\circ$  的对称位置  $305.2^\circ$  附近安装修正  $MgF_2$  膜层均匀性的修正板。修正板的初始形状通过计算得出, 如图 5 所示。

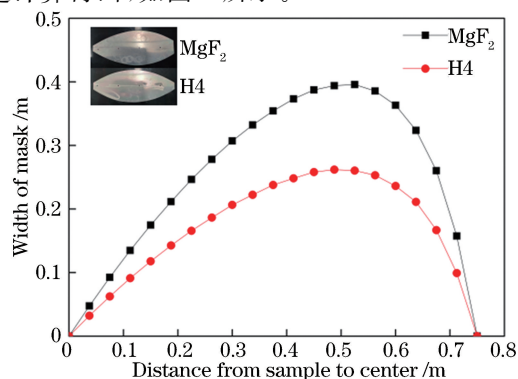


图 5 两个修正板的计算宽度

Fig. 5 Computational widths of two corrected masks

采用成都国泰真空设备有限公司的 ZZS1550 型镀膜机,采用电子束蒸发方式,分别镀制物理厚度为 300 nm 的 H4 单层膜和物理厚度为 420 nm 的 MgF<sub>2</sub> 单层膜。本底真空度均为 2.0 × 10<sup>-3</sup> Pa, H4 薄膜在镀膜过程中的真空度采用压强进行控制。具体工艺参数如表 1 所示。H4 单层膜和 MgF<sub>2</sub> 单层膜的反射率曲线如图 6 所示。根据实测反射率曲线,通过理论拟合确定薄膜的物理厚度。H4 单层膜和 MgF<sub>2</sub> 单层膜的膜厚分布如图 7 所示。H4 单层膜和 MgF<sub>2</sub> 单层膜的膜厚均匀性分别为 0.13% 和 0.26%。膜厚均匀性的计算公式为

$$\Delta d = \frac{d_{\max} - d_{\min}}{\bar{d}} \times 100\%, \quad (4)$$

式中:  $d_{\max}$ 、 $d_{\min}$  分别为镀制的样品的最大膜厚与最小膜厚;  $\bar{d}$  为所有样品的平均膜厚。

表 1 H4 单层膜与 MgF<sub>2</sub> 单层膜的蒸镀工艺参数

Table 1 Evaporation process parameters of H4 monolayer film and MgF<sub>2</sub> monolayer film

Material	Degree of vacuum /Pa	Substrate temperature /°C	Evaporation rate /(nm · s <sup>-1</sup> )
H4	10 <sup>-2</sup>	280	0.3
MgF <sub>2</sub>		280	0.6

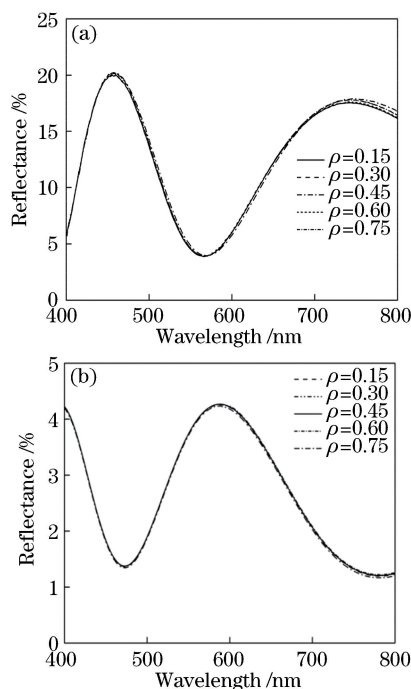


图 6 两种薄膜的反射率曲线。(a) H4 单层膜;  
(b) MgF<sub>2</sub> 单层膜

Fig. 6 Reflectivity of two films. (a) H4 monolayer film;  
(b) MgF<sub>2</sub> monolayer film

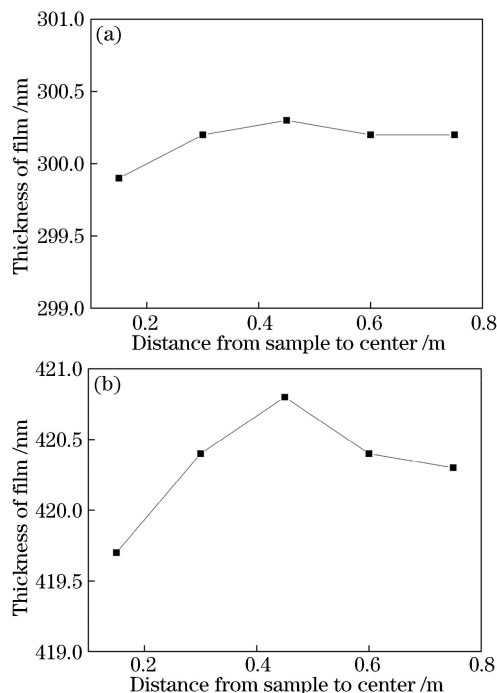


图 7 两种薄膜的膜厚分布。(a) H4 单层膜;  
(b) MgF<sub>2</sub> 单层膜

Fig. 7 Thickness distributions of two films.

(a) H4 monolayer film; (b) MgF<sub>2</sub> monolayer film

需要说明的是,依据实际镀膜情况,在镀膜过程中对修正板尺寸进行了微调,如图 5 所示。

实际操作中常有选择极角为 0° 和 180° 方向放置修正板的情况,此时,通常会出现两个问题。首先,在 180° 方向上的修正板通常呈三角形,而该方向上单位遮挡角度对应的膜厚最小,三角形底部的宽度会很大,有时甚至会影响修正板的升降。其次,光谱的重复性不好。这是由于此处是膜厚对距离  $\rho$  第二敏感的区域,膜厚分布对修正板的仰角和尺寸变化,以及蒸发源的位置变化都很敏感,加之修正板升降以及膜料蒸发的波动性,因此光谱重复性不好。

## 4 结 论

针对单源蒸发条件下旋转球面夹具的膜厚均匀性进行了理论计算。利用极坐标法对膜厚分布进行简化表征,对修正板放置位置进行分析。对于给定的膜料,存在两个对称的极角,在这两个方向上放置修正板时,修正板更容易修剪,且膜厚分布对形状、尺寸以及蒸发源光斑移动不敏感。采用极坐标表征法分别计算了 H4 膜层和 MgF<sub>2</sub> 膜层在不同位置的瞬时膜厚分布,得到修正板的放置角度分别为 60° 和 54.8°,并按照遮挡法计算了修正板的形状。在 ZZS1550 型镀膜机上,根据计算角度安装修正板,分



别镀制了 H4 单层膜和 MgF<sub>2</sub> 单层膜, 它们的厚度均匀性偏差优于 0.3%, 证明了所提方法的可行性。

## 参 考 文 献

- [1] Jaing C C. Designs of masks in thickness uniformity [J]. Proceedings of SPIE, 2010, 7655: 76551Q.
- [2] Wang C J, Xiong S M. Correction for film thickness uniformity of large aperture optical components [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2007, 19(7): 1153-1157.  
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.
- [3] Tang J F, Gu P F, Liu X, *et al.* Modern optical thin film technology [M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2006: 271-278.  
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: 271-278.
- [4] Ai W J, Xiong S M. Analysis of film thickness uniformity for large aperture of 3.6 m in diameter [J]. Opto-Electronic Engineering, 2011, 38(11): 73-78.  
艾万君, 熊胜明. 3.6 m 大口径镀膜机膜厚均匀性分析 [J]. 光电工程, 2011, 38(11): 73-78.
- [5] Guo C, Kong M D, Liu C D, *et al.* Shadowing masks for thickness uniformity in a plane planetary system [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33 (2): 0231002.  
郭春, 孔明东, 柳存定, 等. 平面行星系统修正挡板校正膜厚均匀性 [J]. 光学学报, 2013, 33 (2): 0231002.
- [6] Fang M, Zheng W J, Wu M, *et al.* Improved design of uniformity mask for flat planetary fixture [J]. Chinese Journal of Vacuum Science and Technology, 2006, 26(4): 286-289.  
方明, 郑伟军, 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.
- [7] Kotlikov E N, Prokashev V N, Ivanov V A, *et al.* Thickness uniformity of films deposited on rotating substrates [J]. Journal of Optical Technology, 2009, 76(2): 100-103.
- [8] Pan D L, Xiong S M, Zhang Y D, *et al.* Film uniformity calculation of large caliber coating machine [J]. High Power Laser & Particle Beams, 2000, 12 (3): 277-280.  
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.
- [9] Dong L, Zhao Y A, Yi K, *et al.* Influence of different kinds of evaporation sources on films uniformity [J]. High Power Laser & Particle Beams, 2005, 17(10): 1518-1522.  
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.
- [10] 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.
- [11] Sassolas B, Flaminio R, Franc J, *et al.* Masking technique for coating thickness control on large and strongly curved aspherical optics [J]. Applied Optics, 2009, 48(19): 3760-3765.
- [12] Abzalova G I, Sabirov R S, Mikhailov A V. Depositing uniform-thickness coatings on large surfaces by means of electron-beam evaporation in vacuum [J]. Journal of Optical Technology, 2005, 72 (10): 799-801.
- [13] Zhu Y Q. Study on film thickness uniformity of planetary fixture [J]. Vacuum, 2010, 47(5): 57-59.  
朱元强. 行星夹具膜厚均匀性分析 [J]. 真空, 2010, 47(5): 57-59.
- [14] Zhang L C, Gao J S. Design of uniformity correction masks based on shadow matrix [J]. Optics and Precision Engineering, 2013, 21(11): 2757-2763.  
张立超, 高劲松. 基于遮挡矩阵的膜厚修正挡板的设计 [J]. 光学精密工程, 2013, 21(11): 2757-2763.