

激光与光电子学进展

电子束蒸发球面夹具系统膜厚均匀性的研究

潘永刚^{1*}, 刘政¹, 王奔², 张四宝¹, 吕辰瑞¹¹中国科学院西安光学精密机械研究所, 陕西 西安 710119;²上海米峰激光科技有限公司, 上海 200120

摘要 基于电子束蒸发小面源非余弦膜厚的分布公式,研究了电子束蒸发球面夹具系统光学薄膜厚度的分布均匀性。同时建立数学模型,通过 MathCAD 编程求解修正挡板的形状及摆放位置,控制光学薄膜厚度的分布均匀性。以蒸发 Ta₂O₅ 薄膜为例,优化修正挡板的位置及形状,并制备厚度为 600 nm 的 Ta₂O₅ 单层薄膜。实验结果表明,采用该模型优化设计的修正挡板,实际厚度不均匀性为 0.6%,验证了该模型的可行性与正确性。

关键词 薄膜; 均匀性; 电子束蒸发; 球面夹具; 修正挡板

中图分类号 O484 文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP202158.0531001

Research on Film Thickness Uniformity of Electron Beam Evaporation Spherical Fixture System

Pan Yonggang^{1*}, Liu Zheng¹, Wang Ben², Zhang Sibao¹, Lü Chenrui¹¹*Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences,**Xi'an, Shaanxi 710119, China;*²*Shanghai Mifeng Laser Technology Co., Ltd., Shanghai 200120, China*

Abstract Based on the non-cosine film thickness distribution formula of the small area source in electron beam evaporation, the distribution uniformity of optical thin film thickness of the electron beam evaporation spherical fixture system is studied in this paper. At the same time, the mathematical model is established, the shape and position of the correction mask are corrected by MathCAD programming, so as to control the thickness distribution uniformity of the optical thin film. Set the evaporated Ta₂O₅ thin films as an example, the position and shape of the correction mask are optimized, and Ta₂O₅ single-layer thin film with thickness of 600 nm is fabricated. Experimental results show that the actual thickness nonuniformity of the modified baffle optimized by the model is 0.6%, which validates the feasibility and correctness of the model.

Key words thin films; uniformity; electron beam evaporation; spherical fixture; correction mask

OCIS codes 310.0310; 310.6805; 310.6870

1 引言

光学薄膜厚度(膜厚)均匀性是评价薄膜特性的重要指标之一,特别是对大口径、高精度的现代光学

薄膜尤为重要,直接影响了薄膜元件系统的整体性能^[1-2]。光学薄膜厚度均匀性是指同一光学元件表面不同位置或元件位置不同时膜厚的变化情况^[3]。薄膜厚度均匀性受多种因素影响,如镀膜系统的结构、

收稿日期: 2020-07-07; 修回日期: 2020-08-07; 录用日期: 2020-08-27

基金项目: 中国科学院自研项目(Y490771C01)、“十三五”装备预研公用技术和领域基金(414xxxx0202)

* E-mail: pyg_optics@163.com

几何尺寸、夹具形状、蒸发源特性及薄膜沉积工艺^[4-5]。随着科技的发展,现代高精密光学薄膜元件对膜厚均匀性的要求更严苛,仅通过优化上述参数,难以满足技术要求,因此,需要添加修正挡板改善薄膜厚度的均匀性。国内外研究人员提出了多种改善薄膜厚度均匀性的方法^[6-8],如Sassolas等^[6]通过两次迭代实验,设计了花瓣形状的修正挡板,在口径为500 mm的凹面镜上沉积Ta₂O₅薄膜,膜厚均匀性可控制在0.7%以内;Villa等^[7]研究了大面积薄膜的膜厚均匀性分布,强调基板的旋转对提高膜厚均匀性的作用,总结了几种典型挡板设计的经验公式,并通过实验验证了这些经验公式的正确性;张立超等^[8]提出遮挡矩阵的方法,并基于该方法设计了膜厚修正挡板,通过对挡板进行合理的划分,建立了膜厚空间分布与挡板形状之间精确的定量关系。在不需要进行事后修正的情况下,准确计算出修正挡板的形状,并通过实验验证了该方法的有效性。

本文针对电子束热蒸发球面夹具系统提出了一种新的薄厚均匀性优化方法。基于非余弦定理研究了电子束热蒸发源的蒸发特性,建立了数学和物理模型,提出一种快速优化修正挡板的方法,并通过实验验证了该方法的准确性。

2 理论建模

2.1 电子束蒸发源的特性

Holland^[9]根据蒸发特性将蒸发源分为点源和小面源,其中,点源蒸发分子在空间各个方向均匀分布,小面源蒸发分子在空间各方向按余弦分布。实际镀膜过程中,蒸发源具有一定的尺寸,不存在理想的点源模型,因此,主要以小面源的蒸发特性为基础。在电子束蒸发过程中,蒸发源附近蒸发分子之间相互作用,导致其并非完全按 $\cos \varphi$ 余弦分布,多数服从 $\cos^n \varphi$ 分布,其中, φ 为蒸发源法线与蒸发源和镀膜表面连线的夹角(蒸发角), n 为材料蒸发特性值,与蒸发状态及蒸发材料本身有关^[10]。

2.2 蒸发源薄膜厚度分布特性

小面源蒸发源薄膜厚度的分布^[9]可表示为

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

式中, m 为蒸发材料的总质量, μ 为蒸发材料的密度, r 为镀膜元件与蒸发源之间的距离, θ 为镀膜表面法线与连接蒸发源和镀膜表面元直线的夹角。薄膜厚度分布的参数如图1所示,其中, ds 为入射的

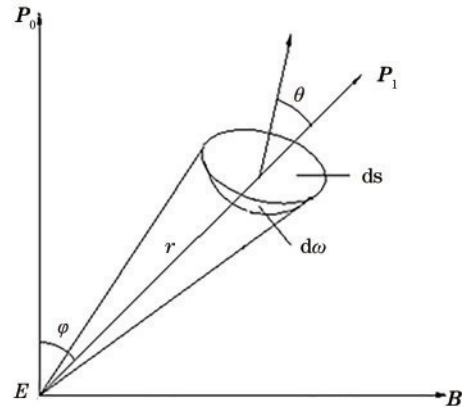


图1 薄膜厚度分布的参数

Fig. 1 Parameters of the thin film thickness distribution

小镀膜平面, $d\omega$ 为与蒸发方向夹角为 θ 的倾斜小平面的立体角, P_1 为蒸发源到小镀膜平面的向量。

2.3 旋转球面夹具薄膜厚度分布均匀性的建模

建立如图2所示的直角坐标系,蒸发源位于Y轴,坐标原点为蒸发源平面与球面夹具轴线的交点。其中, H 为球面夹具中心到蒸发源面的垂直距离, L 为蒸发源到与球面夹具轴线的距离, α 为球面夹具上P与球心连线和球面夹具轴线的夹角, ρ 为P点到球面夹具轴线的距离。建模需要确定的参数:1)蒸发源坐标(X_s, Y_s, Z_s)及夹具上任意点P的坐标(X, Y, Z);2)蒸发距离 r ,蒸发角 φ ,投影角 θ 。建模需要定义的函数如下。

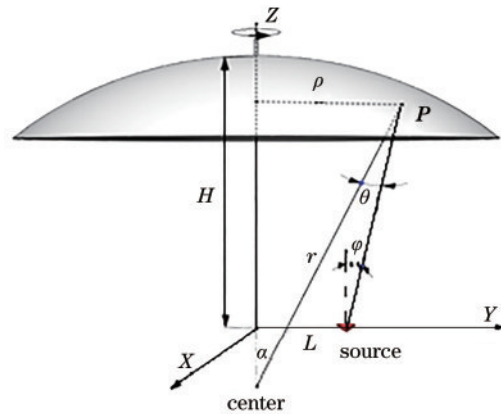


图2 旋转球面夹具的示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the rotating spherical fixture

1) 根据膜厚分布定义挡板函数 X_{Pass} 。 $X_{Pass} = 1$,表示粒子能通过修正挡板; $X_{Pass} = 0$,表示粒子被挡板拦截。

2) 薄膜厚度分布可表示为

$$T = \frac{m}{\pi \mu} \sum_i \frac{\cos^n \varphi \cos \theta \cdot X_{pass1} X_{pass2} \cdots}{r^2}, \quad (2)$$

式中, $X_{pass1}, X_{pass2} \dots$ 为多挡板, t 为时间。

根据建模流程, 确定建模的基本参数如下。

1) 蒸发源位于坐标 Y 轴上, 即 $(X_s, Y_s, Z_s) = (0, L, 0)$ 。

2) 球面夹具上任一点 P 的坐标是关于时间 t 和旋转角速度 ω 的函数, 可表示为

$$X = \rho \sin \omega t, Y = \rho \cos \omega t, Z = H + \sqrt{R^2 - \rho^2} - R, \quad (3)$$

式中, R 为球面夹具的半径。

3) 蒸发距离 r , 即 P 点到蒸发源的距离为

$$r = \sqrt{X^2 + (Y - L)^2 + Z^2}. \quad (4)$$

4) 蒸发角 φ 可由向量关系表示为

$$\cos \varphi = \frac{P_c P \cdot PP_s}{|P_c P| |PP_s|}, \quad (5)$$

式中, P_s 为球心坐标, P_s 为蒸发源的坐标。

5) 投影角 θ 可由向量关系表示为

$$\cos \theta = \frac{D \cdot PP_s}{|D| |PP_s|}, \quad (6)$$

式中, $D = (0, 0, 1)$ 。

6) 旋转球面修正挡板的设计

实际使用中, 修正挡板会向上仰起一个角度,

给确定修正挡板坐标造成一定的困难。通过空间坐标变换建立新的坐标系解决该问题, 坐标变换示意图如图 3 所示。其中, $O-XYZ$ 为原坐标系, $O'-X'Y'Z'$ 为修正挡板所在的坐标系。坐标原点 O' 位于挡板根部, 挡板所在面为 $X'O'Y'$ 平面, Z' 轴垂直 $X'O'Y'$ 平面向上, H' 为 O' 到原坐标系 Y 轴的距离。通过坐标变换, 将原坐标系变换到修正挡板所在的新坐标系。

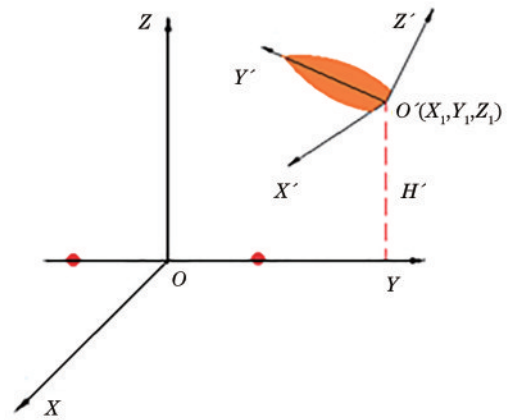


图 3 修正挡板的坐标变换

Fig. 3 Coordinate transformation of the correction mask

新坐标系下, 球面夹具上任一点坐标 P_{new} 可表示为

$$P_{new} = P \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ X_1 & Y_1 & Z_1 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \alpha_z & \sin \alpha_z & 0 & 0 \\ -\sin \alpha_z & \cos \alpha_z & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha_x & \sin \alpha_x & 0 \\ 0 & -\sin \alpha_x & \cos \alpha_x & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (7)$$

蒸发源坐标 P_{snew} 可表示为

$$P_{snew} = P_s \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ X_1 & Y_1 & Z_1 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \alpha_z & \sin \alpha_z & 0 & 0 \\ -\sin \alpha_z & \cos \alpha_z & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha_x & \sin \alpha_x & 0 \\ 0 & -\sin \alpha_x & \cos \alpha_x & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (8)$$

式中, α_z 为修正挡板 u 绕 Z' 轴旋转的角度, α_x 为 u 绕 X' 轴旋转的角度。

通过判断 P_{new} 与 P_{snew} 的连线是否通过修正挡板平面, 确定蒸发粒子是否被修正挡板拦截, 如果连线通过修正挡板平面, 则粒子被修正挡拦截, 定义修正挡板函数 $X_{pass} = 0$; 反之, $X_{pass} = 1$ 。然后对时间 t 进行求和, 得到有修正挡板时球面夹具上沉积的薄膜厚度为

$$T = \frac{m}{\pi \mu} \sum_i \frac{\cos^n \varphi \cos \theta \cdot X_{pass}}{r^2}. \quad (9)$$

由于计算量繁琐, 为了准确模拟设计修正挡

板, 采用 MathCAD 编写程序。

3 实验结果及分析

3.1 蒸发特性值 n 的确定

实验在德国莱宝 ARES1350 型镀膜机完成验证, 系统的基本配置参数如表 1 所示。用编写的 MathCAD 程序模拟无修正挡板时该系统不同蒸发特性值 n 的薄膜厚度分布曲线, 如图 4 所示。

沿着球形夹具径向均匀放置 10 个直径为 30 mm、厚度为 1 mm 的 B270 样片, 由中心向外依次编号 1~10。在无修正挡板情况下沉积厚度为

表 1 系统的基本参数

Table 1 Basic parameters of the system

Name	R/mm	H/mm	L/mm	$\omega/(\text{rad}\cdot\text{s}^{-1})$
Value	1560	1400	330	2π

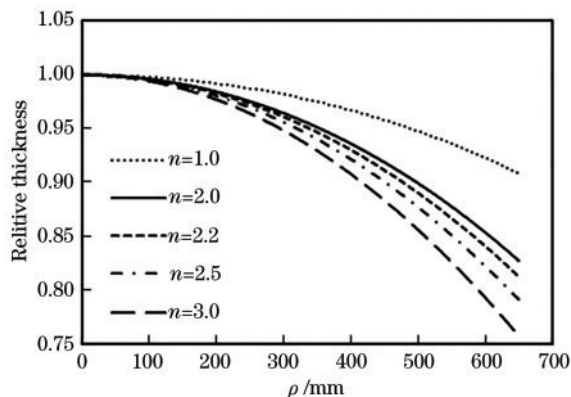


图 4 不同 n 时的薄膜厚度分布曲线

Fig. 4 Thin films distribution curves of different n values

600 nm 的 Ta_2O_5 薄膜。采用 Lamda950 分光光度计分别检测 10 个样片的光谱透过率曲线,然后基于光谱拟合法利用 MCalc 膜系设计软件拟合出不同样片上实际沉积 Ta_2O_5 薄膜的物理厚度。以 1 号样片的实际物理厚度为基准,分别计算出其余样片的厚度,并与模拟的不同 n 值膜厚曲线进行拟合,结果如图 5 所示。可以发现, Ta_2O_5 薄膜在该系统沉积条件下,蒸发特性值 n 约为 2.2。材料的蒸发特性值 n 与材料、蒸发方式及坩埚等因素有关^[11],因此可认为有修正挡板时, Ta_2O_5 材料的蒸发特性值 n 为 2.2。

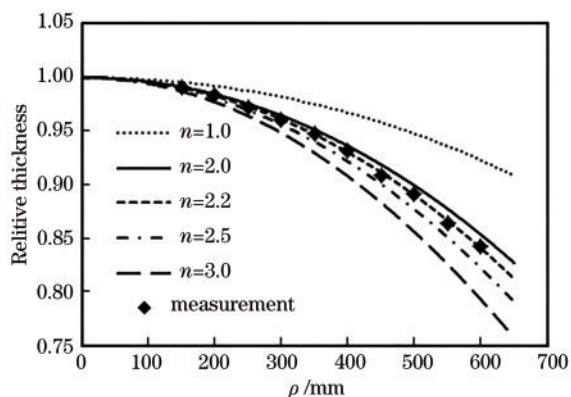


图 5 相对膜厚的分布曲线

Fig. 5 Distribution curve of the relative thin film thickness

3.2 修正挡板的设计

采用 MathCAD 中有修正挡板的程序,通过优化修正挡板的高度及仰角,计算出合理的修正挡板形状。当修正挡板的高度为 1050 mm,仰角为 23° 时,求解出修正挡板形状的圆滑变化如图 6 所示,此

时模拟的薄膜厚度分布曲线如图 7 所示。

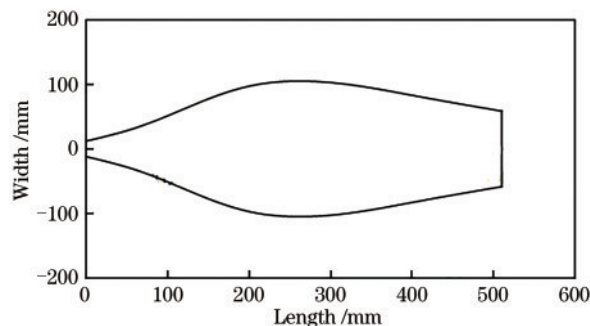


图 6 修正挡板的形状

Fig. 6 Shape of the correction mask

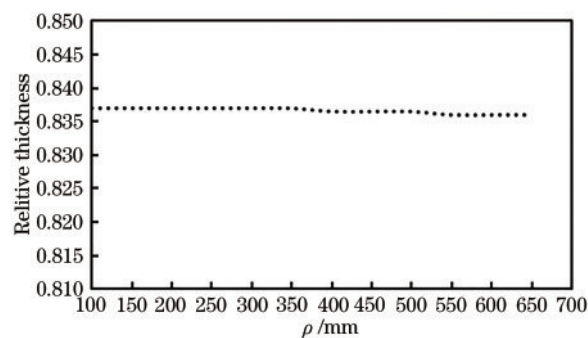


图 7 模拟的膜厚分布曲线

Fig. 7 Curve of the simulated thin film thickness distribution

4 结果与分析

根据图 6 所示的形状尺寸加工修正挡板,修正挡板的高度为 1050 mm,仰角为 23° 。同样,沿着球形夹具径向均匀放置 10 个直径为 30 mm、厚度为 1 mm 的 B270 样片,由中心向外依次编号 1~10,沉积厚度为 600 nm 的 Ta_2O_5 薄膜,用 Lamda950 分光光度计分别测出 10 个样片的光谱曲线,拟合出的实际薄膜厚度分布曲线如图 8 所示。

从图 8 可以发现,实际膜层厚度最大为 502 nm,

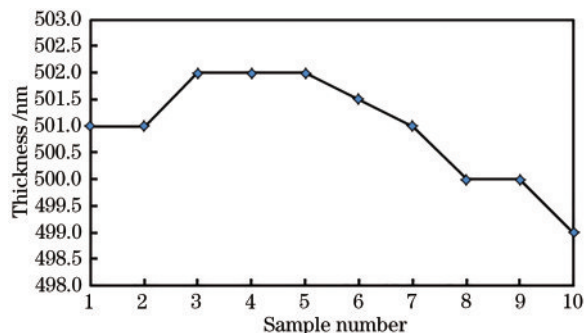


图 8 实际膜厚的分布曲线

Fig. 8 Distribution curve of the actual thin film thickness

最小为 499 nm,膜厚不均匀性为 0.6%。用图 8 中的薄膜厚度数据计算出相对膜厚数据与理论模拟的对比结果,如图 9 所示。可以发现,实际测试与理论模拟存在一定的差异,主要原因:1)电子束蒸发过程中,容易产生挖坑效应^[12],与模拟时采用的小面源存在一定的差异;2)蒸发粒子从蒸发源到样品表面传递的过程中,与真空室内残余气体、蒸发粒子及修正挡板边缘相互碰撞,一定程度上影响了蒸发粒子的分布。

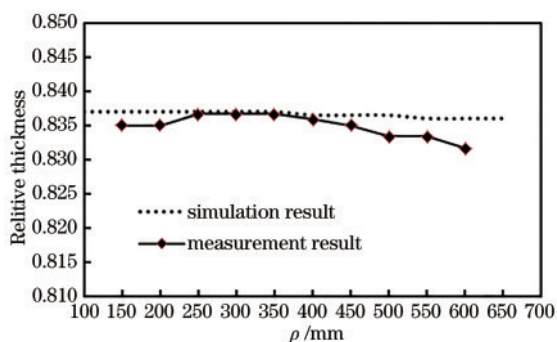


图 9 实际测试与理论模拟的膜厚分布曲线

Fig. 9 Thin films thickness distribution curves of actual measurement and theoretical simulation

5 结 论

研究了电子束蒸发球面夹具系统的膜厚分布均匀性,并建立了数学模型。采用 MathCAD 编写程序,求解修正挡板的安装高度、仰角及形状,提高膜厚分布的均匀性;实际制备了厚度为 600 nm 的 Ta_2O_5 单层薄膜,结果表明,膜厚均匀性可控制在 0.6%,验证了该模型求解修正挡板的可行性。该模型不仅可以提高工艺人员通过添加修正挡板优化膜厚均匀性的效率,还可为镀膜设备生产商在设计方案时提供一定的参考。但理论模型与实际之间还存在一定的差异,后期将继续完善该数学模型,使其更接近实际。

参 考 文 献

[1] Liu C D. Spectrum uniformity optimization of 193 nm AR coatings on spherical substrates [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2019.
柳存定. 球面光学元件表面 193 nm 增透膜光谱均匀性优化技术研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2019.

[2] Fu X H, Zhao D, Lu C, et al. Uniformity of film thickness distribution for single evaporation source

[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(12): 1231001.

付秀华, 赵迪, 卢成, 等. 单一蒸发源膜厚分布的均匀性[J]. 光学学报, 2019, 39(12): 1231001.

[3] Tang J F, Gu P F, Liu X. Modern optical thin film technology[M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2006.

唐晋发, 顾培夫, 刘旭. 现代光学薄膜技术[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2006.

[4] 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.

[5] 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.

[6] 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.

[7] 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.

[8] 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.

[9] Holland L. Vacuum deposition of thin films [M]. London: Chapman & Hall, 1956.

[10] Tang W Z. Preparation principle technology and application of thin film material[M]. 2nd ed. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2003.

唐伟忠. 薄膜材料制备原理技术及应用[M]. 2版. 北京: 冶金工业出版社, 2003.

[11] Wang B, Fu X H, Song S G, et al. Simulation and optimization of film thickness uniformity in physical vapor deposition[J]. Coatings, 2018, 8(9): 325.

[12] Wang N, Shao J D, Yi K, et al. Impact of evaporation characteristics of SiO_2 on uniformity of thin-film thickness [J]. Chinese Journal of Lasers, 2010, 37(8): 2051-2056.

王宁, 邵建达, 易葵, 等. SiO_2 材料蒸发特性对膜厚均匀性的影响[J]. 中国激光, 2010, 37(8): 2051-2056.