

公转结构电子束蒸发成膜的膜厚误差研究

鲍刚华*, 王奔, 谢雨江, 梁玉

上海米峰激光科技有限公司, 上海 201306

摘要 对公转结构电子束蒸发镀膜机的膜厚误差进行研究。提出一种基于非余弦膜厚分布理论的膜厚误差分析方法,并用数学方法对膜厚误差的分布进行表征。膜厚误差是基板表面位置的函数,不仅与镀膜工艺参数有关,还与蒸发源和基板之间的空间结构配置有关。理论分析表明,电子束蒸发源偏离工件盘公转轴,是引起膜厚误差的根本原因。在直径为 2700 mm 的镀膜机上镀制了三层介质膜,利用光谱反演膜厚误差,其结果与膜厚误差分布理论分析结果一致。

关键词 薄膜; 光学薄膜; 电子束蒸发; 镀膜机设计; 膜厚误差

中图分类号 O484

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.1131001

Film Thickness Error in Electron Beam Evaporation with Revolving Structure

Bao Ganghua*, Wang Ben, Xie Yujiang, Liang Yu

Shanghai Multiple Films & Laser Tech., Co., Ltd., Shanghai 201306, China

Abstract In this work, we studied film thickness error in an electron beam evaporator with revolving structure. Using the noncosine film-thickness distribution theory, we propose a method for analyzing the film thickness error, in which the film is formed on the dome structure, and characterize the thickness error distribution using a mathematical method. Analysis shows that the film thickness error is the function of the location of film deposition, which is related not only to the mechanical configuration between evaporation source and substrate but also to the thin-film manufacturing parameters. Results reveal that the film thickness error comes from the deviation of the electron beam evaporation source from the axis of the revolving dome. We prepared a three-layer thin film on a 2700-mm-diameter coating machine. The film thickness error was retrieved using the spectral method. The results are consistent with the theoretical results of thickness error distribution.

Key words thin films; optical thin film; electron beam evaporation; design of thin film coater; error of thin film thickness

OCIS codes 310.1620; 310.1860; 310.3840; 310.4165

1 引言

在光学薄膜的制备过程中,最重要的控制技术是薄膜厚度控制技术^[1]。类如密集型光波复用(DWDM)等高精度的光学薄膜,影响其制备成功率

的核心技术之一就是膜厚误差控制技术^[2-3]。膜厚误差不仅会改变薄膜的光学常数^[4],而且会影响薄膜的光学特性,导致产品报废。因此,薄膜厚度的控制精度是评价设备性能的关键指标之一,从光学镀膜技术诞生起,如何精确控制薄膜厚度就一直

收稿日期: 2020-09-16; 修回日期: 2020-11-02; 录用日期: 2020-12-02

*E-mail: bgh@mfoptics.com

长盛不衰的热点话题之一。

影响膜厚误差的因素有很多,其中最关键的是膜厚监控技术^[5]。精确地监控薄膜厚度,不仅要考虑薄膜结构设计^[6-7],还要研究蒸发设备的机械结构。所谓机械结构,是指蒸发源与基板之间的几何位置关系,比如工件盘的行传、基板的运动方式、蒸发源的几何位置等。迄今为止,通过优化镀膜设备的机械结构来改善薄膜厚度分布特性的成果已经很多^[8-9],但对于机械结构与膜厚误差关系的研究依然不够丰富。

电子束蒸发镀膜机是当前光学镀膜设备的重要组成部分^[10-11]。本文以电子束蒸发镀膜机为例,基于非余弦膜厚分布理论,对公转结构的膜厚误差分布进行研究。从理论上分析公转结构产生误差的原因,给出膜厚误差与基板位置的函数关系。研究结果可为膜厚误差控制以及镀膜机的结构设计提供参考。

2 膜厚误差的理论分析

关于电子束蒸发的薄膜厚度分布,在大部分情况下可以做如下假设:蒸发分子在飞到基板沉积表面之前不与其他气体分子发生碰撞,到达基板沉积表面后,立即凝结成膜,且蒸发源的蒸气发射特性不随时间变化。此时,工件盘上各个位置的瞬间薄膜厚度分布遵守非余弦分布定律。旋转球面夹具的面源蒸发满足^[12]

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

式中: m 为蒸发材料的质量; μ 为蒸发材料的密度;指数 n 为材料的特性参数,与蒸发特性有关。当工件盘围绕公转轴的旋转角度 $\psi=0^\circ$ 时,即工件盘上样品点 S 位于蒸发源正上方平面时,(1)式中各物理量的几何关系如图1所示。

图1中 E 表示蒸发源, O 表示工件盘的球心位置, H 为蒸发源所在水平面到工件盘顶部的距离, r 为蒸发源到工件的距离, R 为工件盘的半径, φ 为蒸发角, h 为 S 点距蒸发源所在平面的高度, ρ 为球罩型工件盘上 S 点到公转轴的距离, L 为蒸发源到公转轴的距离, ω 为 S 点和球面夹具球心点连线与工件盘公转轴的夹角。

对于确定结构的电子束蒸发镀膜机,当蒸镀某一膜料时,(1)式可以写为

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

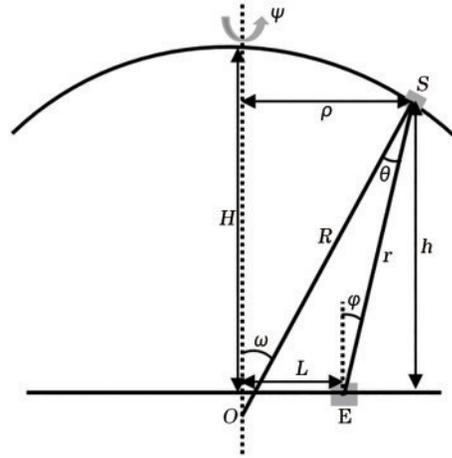


图1 非余弦膜厚计算的几何示意图

Fig. 1 Polar coordinate diagram of non-cosine film thickness calculation

式中: t 为薄膜厚度; $a = \frac{mh^n (h \cos \omega + \rho \sin \omega)}{\pi \mu}$; $b = \frac{mh^n L \sin \omega}{\pi \mu}$; $c = h^2 + L^2 + \rho^2$; $d = 2L\rho$; $e = \frac{n+3}{2}$ 。

对于确定的 S 点, a 、 b 、 c 、 d 、 e 均可视为常数,(2)式中 t 可以看作是旋转角度 ψ 的函数,即(2)式可以用极坐标作图法进行表述。

以直径为2700 mm的国产箱式电子束蒸发镀膜机设备为例,做进一步说明。假设所镀膜料为 MgF_2 ,设备中各项参数如表1所示。

表1 直径为2700 mm的镀膜机结构参数

Table 1 Parameters of thin film coater with 2700 mm diameter

Parameter	Diameter of vacuum chamber /mm	R /m	L /m	H /m	n
Value	2700	2.600	0.900	1.650	2.5

对 $\rho=0.54$ m对应的不同 ψ 角位置的瞬时沉积膜厚进行计算,其计算结果在极坐标中的分布如图2黑色曲线所示。曲线围成的面积值表示基板旋转一周所沉积的薄膜厚度。当镀制较厚的膜层时,位于不同 ψ 角位置的镜片具有相同的沉积厚度,但当镀制超薄层时,则会出现薄膜厚度分布不均匀的情况,下面针对镀制超薄层的情况进行讨论。

在超薄膜层的镀膜过程中,可能面临如下情况:假设设备的转速为6 r/s,但镀制超薄层时,3 s后位于工件盘中心位置的晶振检测厚度已经到了设定值,镀膜停止,此时工件盘还没有转够一整圈,因此不同 ψ 角位置的沉积厚度不同。

对于起始位置 $\psi=90^\circ$ 的镜片,沉积薄膜的厚度

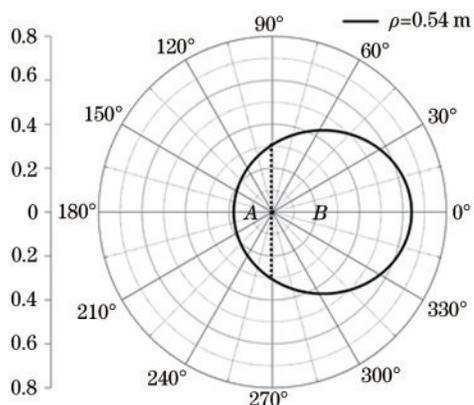


图 2 瞬时薄膜厚度的极坐标图示

Fig. 2 Instantaneous film thickness distribution at polar coordinate system

可以用图 2 中 ψ 值从 90° 到 270° 之间的曲线围成的面积 A 表示;对于起始位置 $\psi=270^\circ$ 的镜片,沉积薄膜的厚度可以用图 2 中曲线围成的剩余面积 B 表示,两者的差值就是最大的膜厚差。由于起始位置是随机的,因此,此膜厚差可以认为是 $\rho=0.54\text{ m}$ 对应的不同 ψ 角位置沉积厚度的膜厚误差的最大值。在蒸发速率稳定的情况下,假设镜片旋转一周所沉积的薄膜厚度为 D ,则最大膜厚差可表示为

$$\Delta D_\rho = D_\rho \times \frac{|A - B|}{A + B} \times 100\% \quad (3)$$

对比(2)式和(3)式,发现最大误差与极坐标图中瞬时膜厚分布的不对称有关,并且是镜片到公转轴的距离 ρ 的函数。在实际镀膜中,必须保证工件盘各个位置膜厚的均匀性。假设各圈膜厚一致,则最大膜厚误差与镜片到公转轴的距离 ρ 的关系如图 3 所示。可以发现,镜片到公转轴的距离 ρ 越大,膜厚误差也越大。当 $\rho=1.2\text{ m}$ 时,如果公转速率为 6 r/s ,镀膜速率为 1 nm/s ,则最大膜厚误差可以达到 $6\text{ s} \times 1\text{ nm/s} \times 71.3\% = 4.278\text{ nm}$ 。薄膜的薄层

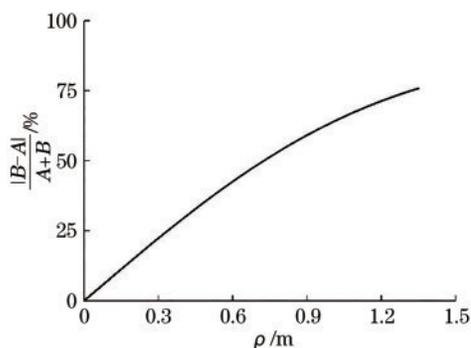


图 3 膜厚误差与基板位置的关系

Fig. 3 Physical thickness error distribution at different substrate positions

厚度通常为 10 nm 左右,这样量级的误差会对镀膜光谱产生很大影响。

3 实验及讨论

考虑到薄层物理厚度的精确测量难度较大,因此本实验构建了一个特殊的膜系结构:G|2H0.05L2H|Air。其中,H表示 Al_2O_3 ,L表示 MgF_2 。参考波长为 600 nm 。通过该膜系的测量光谱反演膜厚误差,进而表征超薄层的膜厚误差。

镀膜样品放置位置如图 4 所示。在 $\rho=0.6\text{ m}$ 对应的圈上,等间距放置 6 片 BK7 材质的镜片,编号为 1#~6#。同样地,在 $\rho=1.2\text{ m}$ 对应的圈上,等间距放置 6 片 BK7 镜片,编号为 1~6。1#与 1 对应,具有相同的旋转角 ψ ,以此类推。

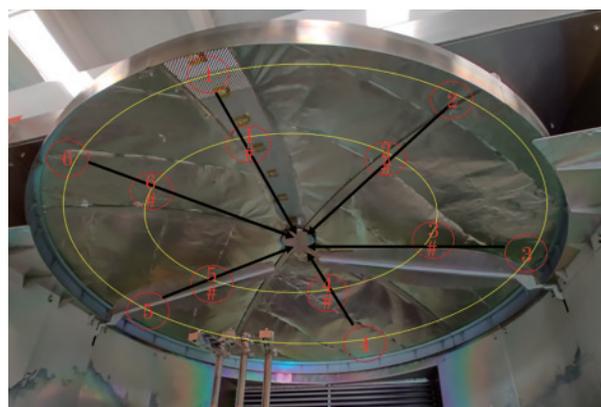


图 4 样品放置位置示意图

Fig. 4 Positions of samples

Al_2O_3 镀膜的速率为 0.2 nm/s ,公转夹具的公转速率为 3 r/s 。在镀 MgF_2 的时候,速率为 1 nm/s ,公转夹具的公转速率为 6 r/s 。

在镀膜前先通过传统方法试制了单层膜,确认了机器的均匀性(表 2)。通过光谱拟合得到的物理厚度数据如下: Al_2O_3 膜厚均匀性小于 1% ,拟合膜厚的误差约为 1 nm 。反演得到的 MgF_2 膜厚误差为 1 nm ,均匀性接近 1% 。

表 2 薄膜厚度均匀性分布

Table 2 Uniform thickness distribution of thin films

ρ / m	Sample number	MgF_2 film thickness / nm	Al_2O_3 film thickness / nm
0.6	1	223	186
1.2	1#	221	185

镀膜后使用 PE 1050 分光光度计对样品进行全部测试,为避免测试误差对分析结果的影响,所有样品均在同一基线下进行测量,并且每个样品测试 3 次

后求平均值,此值作为该样品的光谱反射率,其测试结果如图 5 所示。在 400~700 nm 波段呈明显的 W 型光谱,峰值反射率出现在 480 nm 附近。考察图 5(a),在 $\rho=0.6$ m 对应的不同 ψ 角位置上,位置 1# 的光谱峰值反射率最小,位置 4# 的光谱峰值反射率最大。

在已知 Al_2O_3 薄膜厚度精度的基础上, MgF_2 薄膜的厚度误差会影响 480 nm 附近峰值反射率。薄

膜越厚,对应的峰值反射率越低。参考图 2,可以认为位置 1 对应于起始位置 $\psi=270^\circ$,位置 4 对应于起始位置 $\psi=90^\circ$,两个位置的膜厚相差最大。实测光谱与图 2 所示的理论结果具有很好的一致性。

考察图 5(b),在 $\rho=1.2$ m 对应的圈上,位置 1 的光谱峰值反射率最小,位置 4 的光谱峰值反射率最大。反演得到的 MgF_2 薄膜厚度误差分布规律与图 5(a) 相同,同样与图 2 所示的理论结果吻合。

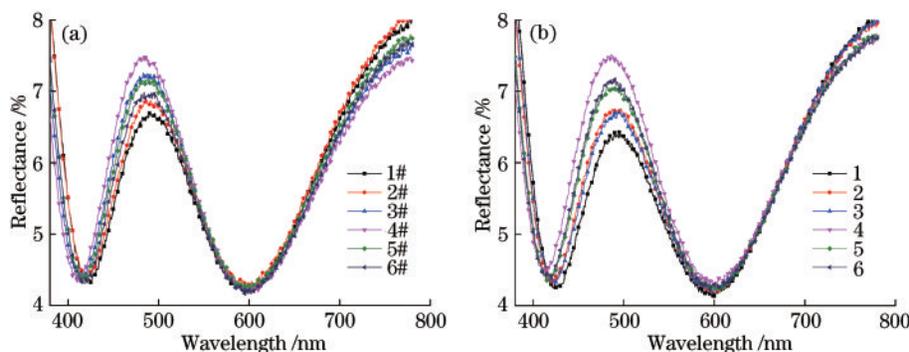


图 5 ρ 取不同值时,不同位置的光谱曲线。(a) $\rho=0.6$ m; (b) $\rho=1.2$ m

Fig. 5 Spectral curves of different locations with different ρ values. (a) $\rho=0.6$ m; (b) $\rho=1.2$ m

表 3 给出了 480 nm 附近峰值反射率极大值和极小值的数据,以及拟合得到的膜厚误差。在 $\rho=0.6$ m 对应的圈上,反射率峰值的最大误差为 0.79%,反演得到 MgF_2 膜层厚度差为 5.3 nm。在 $\rho=1.2$ m 对应的圈上,反射率峰值的最大误差为 1.11%,反演得到 MgF_2 膜层厚度差为 7.0 nm。 $\rho=1.2$ m 对应圈的厚度误差大于 $\rho=0.6$ m 对应圈的膜厚误差。这一结论与图 3 所示的预测结果一致,即镜片位置离公转中心越远,引起的膜厚误差越大。

表 3 不同位置的 MgF_2 膜厚误差

Table 3 MgF_2 thickness errors at different positions

ρ / m	Peak reflectivity / %		Inversion error / nm
	Minimum	Maximum	
0.6	6.69	7.48	5.3
1.2	6.41	7.52	7.0

4 结 论

对电子束源蒸发条件下旋转球面夹具的膜厚误差分布进行理论计算。基于非余弦膜厚分布理论的分析结果表明,蒸发源偏离球面夹具公转轴,使得工件盘不同位置的瞬时沉积膜厚产生差异,这是镀膜过程中产生膜厚误差的重要原因。

用数学方法对膜厚误差的分布进行分析,得到

膜厚误差随基板偏离公转轴距离的变化曲线。在直径为 2700 mm 的镀膜机上,以 MgF_2 镀膜为例,验证了这一结论。

依据膜厚误差分布理论,膜厚误差不仅与镀膜工艺参数息息相关,而且与镀膜机的空间结构有关。对于有薄层存在的膜系,内、中、外 3 个位置的光谱并不能代表蒸炉的光谱。为改善这种情况,在设计镀膜机结构时,适当地增大蒸发源到工件盘的高度,缩小蒸发源与公转轴的距离,镀膜时适当提高工件盘的转速,降低镀膜速率,都有利于改善成膜的膜厚误差。实际生产过程中,可以依据计算结果改进镀膜机的结构设计,精确控制镀膜厚度,减小镀膜过程中的膜厚误差。

参 考 文 献

- [1] Fan Z X. Development and recent progress of optical thin films[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(9): 0900131.
范正修. 光学薄膜及其进展[J]. 光学学报, 2011, 31(9): 0900131.
- [2] Willey R R. Achieving narrow bandpass filters which meet the requirements for DWDM[J]. Thin Solid Films, 2001, 398/399: 1-9.
- [3] Xu L Y, Zhou Y. Brief talk on optical thin film technology in optical fiber communication [J].

- Information & Communications, 2014, 27(10): 203.
徐凌云, 周岩. 浅谈光纤通信中的光学薄膜技术[J]. 信息通信, 2014, 27(10): 203.
- [4] Lu J J, Li X Y, Sun X P. Effect of film thickness on optical constants of metal film[J]. Optical Technique, 2012, 38(5): 602-606.
卢进军, 李向阳, 孙雪平. 膜层厚度对金属薄膜光学常数的影响[J]. 光学技术, 2012, 38(5): 602-606.
- [5] Liao Z X, Yang F, Xia W J. The progress of optical thin film thickness monitoring [J]. Laser Journal, 2004, 25(4): 10-12.
廖振兴, 杨芳, 夏文建. 光学薄膜膜厚监控方法及其进展[J]. 激光杂志, 2004, 25(4): 10-12.
- [6] Wu S Y, Long X W, Yang K Y. Application of thin film errors sensitivity control concept to robust design of multilayer optical coatings[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2012, 24(10): 2391-2399.
吴素勇, 龙兴武, 杨开勇. 光学薄膜鲁棒设计中膜系误差灵敏度控制[J]. 强激光与粒子束, 2012, 24(10): 2391-2399.
- [7] Bao G H, Jiao H F, Cheng X B, et al. A new approach to eliminate half-wave holes in short-wave pass filters with layer inhomogeneity [J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(8): 0831001.
鲍刚华, 焦宏飞, 程鑫彬, 等. 一种抑制二倍频半波孔现象的短波通设计方法[J]. 光学学报, 2014, 34(8): 0831001.
- [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] 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 C, 2005, 72(10): 799-801.
- [10] 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.
- [11] Tuniyazi A, Cheng X B, Bao G H, et al. Laser induced damage characteristics of nodules in thin-film polarizers[J]. Infrared and Laser Engineering, 2015, 44(8): 2461-2466.
阿卜杜萨拉木·图尼亚孜, 程鑫彬, 鲍刚华, 等. 偏振分光膜中节瘤的激光损伤特性[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(8): 2461-2466.
- [12] 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.