

光学薄膜厚度修正挡板的设计

林 坚 林永钟 廖群峰

(福建师范大学激光研究所, 福州 350007)

摘 要 本文论述一种用于镀制光学薄膜的厚度修正挡板新的设计方法. 我们通过应用截流蒸气云静止挡板技术和采用平面静止挡板透视投影法来设计光学薄膜厚度修正挡板. 最后给出设计和实验的结果.

关键词 光学薄膜; 厚度修正挡板; 透视投影; 设计

0 引言

我国生产的镀膜设备, 由钟罩型发展到箱式半自动镀膜机, 采用了较先进的蒸发技术和监控技术, 但生产厂家都没有去解决镀膜工作室中膜厚分布不均匀这一关键性的技术问题, 对于要求很高的光学薄膜元件, 常因膜厚均匀性不佳而不能使用, 大大降低了光学薄膜元件的质量和成品率. 我们采用截流蒸气云静止挡板技术, 来消除膜厚分布的不均匀性, 该项技术就是采用特定形状的静止挡板, 置于蒸发源和被镀光学元件之间, 以改变工作室中膜厚分布, 使工件盘各个位置上的膜厚达到均匀的要求, 该技术具有工艺简单、方便可靠等优点.

但由于对称瓣形蒸气云分布的复杂性, 有关工艺分析和静止挡板的设计均涉及到较为复杂的数学处理过程, 为了顺利应用这技术, 本文提出一种较为灵活方便的平面静止挡板透视投影设计新方法. 实验结果表明, 采用此方法设计的厚度修正挡板, 可以理想地消除镀膜工作室中膜厚分布的不均匀性, 极大提高了光学薄膜元件的质量和成品率.

1 基本原理

国产镀膜设备的蒸发源(电子枪或阻蒸舟源)的发射气流分布, 具有对称瓣形蒸气云的特征¹, 其沉积在工件盘上任一点 P 归一化的膜厚为

$$d = d_0 (s_0/s)^2 (\cos^n \alpha \cos \beta / \cos^n \alpha_0 \cos \beta_0) \quad (1)$$

式中 s 是蒸发源和 P 点之间的距离; α 为蒸发源平面的法线与 s 之间的夹角; β 为 P 点所在面元 ds 的法线与 s 之间的夹角, n 为瓣形蒸气云的分布参数, n 值的增加, 表示在较大发射角 α 时, 源的发射量减少, 也就是说源的发射局限于垂直的方向. 而 $d_0, s_0, \alpha_0, \beta_0$ 则为归一化点, 也就是工件盘中心点所对应的各个参数.

方程(1)是计算膜厚分布的基本方程, 除了可计算平面形和球缺工件盘的膜厚分布外, 还可以计算其它任何形状工件盘表面的膜厚分布, 所以, 式(1)具有更加普遍的意义.

由于实际镀膜中, 工件盘是匀速旋转的, 所以, 必须对式(1)进行积分. 同时还要考虑到实际蒸镀中, 膜厚分布还存在各向同性分量 A (与 α 无关的量), 因此, 式(1)更加完善的表达可以写成²

$$\frac{d}{d_0} = \begin{cases} (1-A)K_4I_n + AK_4I_0 & \text{(平面形工件盘)} \\ (1-A)K_4K_2J_n + AK_4J_0 & \text{(球缺形工件盘)} \end{cases} \quad (2)$$

$$\text{式中 } I_n = \frac{1}{\pi} \int_0^\pi \frac{d\varphi}{[a - b \cos \varphi]^{(n+3)/2}}, \quad J_n =$$

$$\frac{1}{\pi} \int_0^\pi \frac{c - e \cos \varphi}{[f - g \cos \varphi]^{(n+3)/2}} d\varphi, \quad I_0 = \frac{1}{\pi} \int_0^\pi \frac{d\varphi}{[a - b \cos \varphi]^{3/2}};$$

$$J_0 = \frac{1}{\pi} \int_0^\pi \frac{c - e \cos \varphi}{[f - g \cos \varphi]^{3/2}} d\varphi = 1 + (R/h)^2 + (q/h)^2;$$

$$b = (2R/h)(q/h); c = (R/h - 1) + (1 - R/h) \cos \gamma;$$

$$e = (q/h) \sin \gamma; f = 1 + (q/h)^2 + (2R/h) \cdot c;$$

$$g = (2R/h)(q/h)\sin\gamma; K_1 = [1 + (q/h)^2]^{(n+3)/2};$$
$$K_2 = 1 - (R/h)(1 - \cos\gamma); K_4 = \left[\frac{1-A}{K_1} + \frac{A}{K_1^{3/(n+3)}}\right]^{-1}.$$

γ 为球缺的球心与被镀点 P 连线和中心轴线之间的夹角, 对于平面工件盘, $\gamma = 0$. 上式中有关各参数的意义见图 1 和图 2.

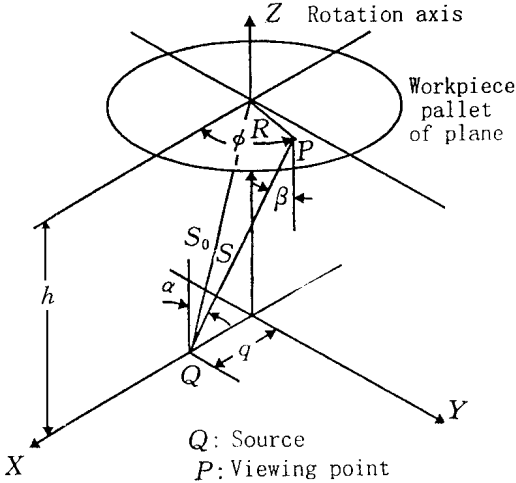


图 1 旋转平面工件盘示意图

Fig 1 The schematic diagram of workpiece pallet for rotatory plane

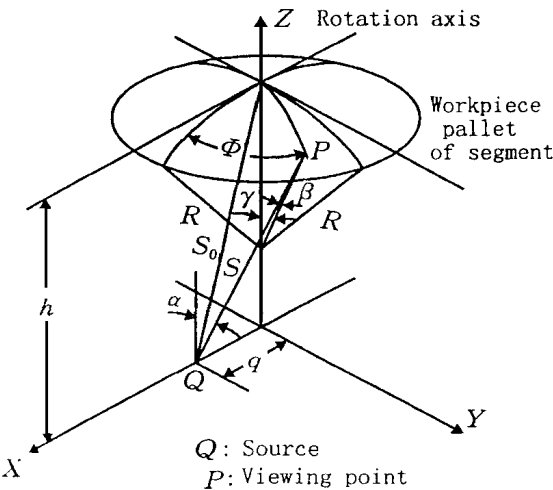


图 2 旋转球缺工件盘示意图

Fig 2 The schematic diagram of workpiece pallet for rotatory segment

式(2)和(3)为平面形工件盘和球缺形工件盘计算膜厚分布的方程. 为了讨论方便, 采用函数形式将式(2)和(3)合并简写

$$\frac{d}{d_0} = t(R, n, A, \overline{POS}) = \frac{1}{\pi} \int t(R) d\varphi \quad (4)$$

式中 $t(R) = t(R, n, A, \overline{POS})$.

该函数式表明镀点 P 的相对厚度仅与镀点的半径 R , (对于球缺来讲则为 γ), 瓣形蒸气云参

数 n, A 以及蒸发源与工件盘的几何位置参数 POS 有关.

通常 POS 是可以测定的, 而 n 和 A 也可由拟合实验来测定, 这样 d/d_0-R 的关系便可由式(2)或(3)来求得, 不少文献^{2,3}已给出这类计算, 其结果表明: 在半径 R 较小的范围内(对球缺则为较小 γ)膜厚的分布基本上是均匀的, 但随着 R 的增加, 均匀越来越差, 为了获得大面积的均匀镀层, 则必须采用截流蒸气云静止挡板技术, 该技术就是根据数学模型, 用计算机设计出一定形状的挡板, 在蒸发过程中, 此挡板挡去部分蒸气流, 以使沉积在工件盘上的膜厚在大面积范围内达到均匀的要求.

我们设挡板对工件盘上半径为 R (对于球缺则为 γ)镀点圆周轨迹的遮角为 $\theta(R)$, 则式(4)可改写为

$$d/d_0 = \frac{1}{2\pi} \int_{\theta(R)} t(R) d\varphi \quad (5)$$

式中 $\theta(R) = 2\pi - \theta(R)$, 积分号 $\int_{\theta(R)}$ 则表示积分沿着挡板开口的轨迹进行, 由此可以看出, 对于不同的 R , 适当地选择 $\theta(R)$, 就可以控制 d/d_0-R 的分布, 这就是截流蒸气云静止挡板设计的依据.

2 蒸气流参数 n, A 的确定

确定 n, A 是截流蒸气云静止挡板设计技术的关键步骤之一, 它的取值不仅与蒸发源类型有关, 而且与蒸发速率, 甚至与蒸发材料都有关, 所以, 必须借助于实验数据与理论计算的拟合来确定, 我们采用的方法是: 在实际的单层镀膜中, 对工件盘不同 R 处的膜厚进行测量, 得到一组膜厚分布 $t_i - \bar{t}_i$ 实测值, 将实测值与式(2)或式(3)的理论计算值相比较, 我们的实验结果表明: 用高斯-牛顿最小二乘法⁴作最佳拟合判据, 可以精确地确定 n, A 的值, 由于数学上的繁杂性, 我们不作详细的推导, 只给出以下几个拟合公式.

首先我们定义 $F = \sum_i [t(R_i) - \bar{t}_i]^2 = \sum_i f_i^2$, 式中 $t(R_i)$ 为理论计算值 $t(R_i, n, A, \overline{POS})$ 的缩写, $\bar{t}_i$ 为实测值, 对 i 求和和要求涉及所有的数据点. 而后我们再定义

$$F_1 = \sum_i f_i \partial f_i / \partial A, F_2 = \sum_i f_i \partial f_i / \partial n,$$
$$F_3 = \sum_i (\partial f_i / \partial n)^2, F_4 = \sum_i (\partial f_i / \partial A)^2, F_5 =$$

$$\sum_i [(\partial \bar{q}_i / \partial n) \cdot (\partial \bar{q}_i / \partial a)], E_1 = (F_2 \cdot F_4 - F_1 \cdot F_5) / (F_3 \cdot F_4 - F_5^2), E_2 = (F_3 \cdot F_1 - F_2 \cdot F_5) / (F_3 \cdot F_4 - F_5^2).$$

则拟合迭代公式为

$$n^{(k+1)} = n^{(k)} - E_1 \quad (6)$$

$$A^{(k+1)} = A^{(k)} - E_2 \quad (7)$$

这里涉及的有关计算公式是

$$f_i = t(R_i) - \bar{t}_i$$

$$\frac{\partial \bar{q}_i}{\partial n} = \frac{\partial \bar{q}_i}{\partial n} \cdot \frac{t(R_i)}{k_4} + \frac{k_4}{\pi} (1 - A) \frac{\partial \bar{q}_i}{\partial n}$$

$$\frac{\partial \bar{q}_i}{\partial a} = \frac{\partial \bar{q}_i}{\partial a} \cdot \frac{t(R_i)}{k_4} + \frac{k_4}{\pi} (I_0 - I_n)$$

其余公式不难推导得出, 虽然上面拟合公式较为复杂, 但主要计算在积分项, 只要采用标准的步长辛普森数值积分法, 是不难完成的。

3 透视投影平面静止挡板的设计

由于 n, A 可以确定, 而几何位置又是相对固定可测量的, 所以, 厚度修正挡板的设计可按式(5)进行。假设预先要求的膜厚分布为 $\bar{d}(R)$, 对于任意 R , 选取 $\theta(R)$ 的初始值为 $\theta(R)$, 计算如下式子:

$$|t(R) - \bar{d}(R)| = \left| \frac{1}{2\pi} \int_{\theta(R)} t(R) d\varphi \bar{d}(R) \right| < \epsilon \quad (8)$$

ϵ 为我们设定的精度, 以一定步长改变 $\theta(R)$, 直到满足预定精度 ϵ 为止, 对于不同的 R , 重复此计算过程, 这样 $\theta(R)$ 便可求得。

根据式(8)确定的 $\theta(R)$, 只是完成紧贴工件盘厚度修正挡板边界形状的设计, 由于在实际使用中, 难以做到这一要求, 若留有间隙, 则会带来误差。特别对于球缺的工件盘来讲, 相应形状的挡板更难以制作, 我们经过多次计算和实验, 认为采用透视投影的方法来设计厚度修正挡板, 是行之有效的办法, 按此方法设计的挡板可以放置在与工件盘有一定距离的位置上。

根据式(8)所求得开口规律 $\theta(R)$ 和紧贴工件盘放置的方位, 我们不难得到厚度修正挡板边界曲线坐标 x, y, z , 设厚度修正挡板放置的高度为 h' , 以蒸发源中心作为投影中心, 将紧贴工件盘放置的厚度修正挡板投影到高度为 h 的平面上, 则根据解析几何的关系, 可以得到高度为 h 的厚度修正挡板边界曲线的坐标为 $x_1 = (q - x)(1 - h'/z) + x, y_1 = h' \cdot y/z$ 。

这里应该注意一点, 半径为 R 的圆弧从工件

盘平面投影到高度为 h 的平面时, 其仍然是圆弧, 但半径则变为 $h R/z$, 圆心移到 $x_c = q(1 - h'/z)$ 处, 这对于确定厚度修正挡板边界是很重要的。

4 实验结果

我们在北京仪器厂生产的 DMD-450 型多层镀膜机上, 设计平面与球缺二种工件盘的厚度修正挡板, 论文中所介绍截流蒸气云静止挡板技术和透视投影曲线表示距球缺中心分别为 30

原则上, $\bar{d}(R)$ 可以是任意给定的一种规律。但实验中发现, 只要让 $\bar{d}(R)$ 在给定的半径范围内取常数来设计挡板, 就可以达到均匀膜厚的目标, 但必须注意, 这个常数应小于整个工件盘半径范围内的最小相对厚度, 否则, 计算出来的 $\theta(R)$ 将超出 2π 。

我们将设计的二种厚度修正挡板(图 3 所示), 分别用在平面工件盘和球缺工件盘来制备两

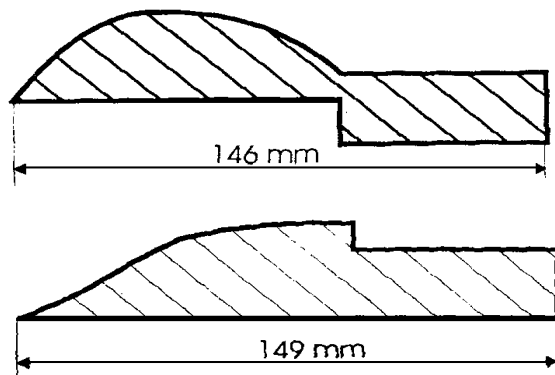


图 3 厚度修正挡板图形

Fig 3 The pattern of closure for thickness revising

种滤光片, 这两种滤光片经日本岛津 UV-365 分光光度计测量, 测量的结果如图 4 所示。图 4(a) 表示采用平面工件盘厚度修正挡板镀制滤光片的实测光谱曲线, 该组曲线表示距平面工件盘中心分别为 30nm, 55nm, 85nm 处三个被镀片所测的三条光谱曲线。图 4(a) 的曲线表明 30nm 和 55nm 处二块滤光片的光谱曲线完全重合在一起, 而 85nm 处的滤光片光谱曲线与它们相比较只相差 1nm, 这比未使用厚度修正挡板前, 最中心一圈和最边上一圈滤光片的光谱曲线相差 30nm~50nm 有极大的改善。图 4(b) 表示采用球缺工件盘厚度修正挡板镀制滤光片的实测光谱曲线, 这二种厚度修正挡板的形状如图 3 所示。

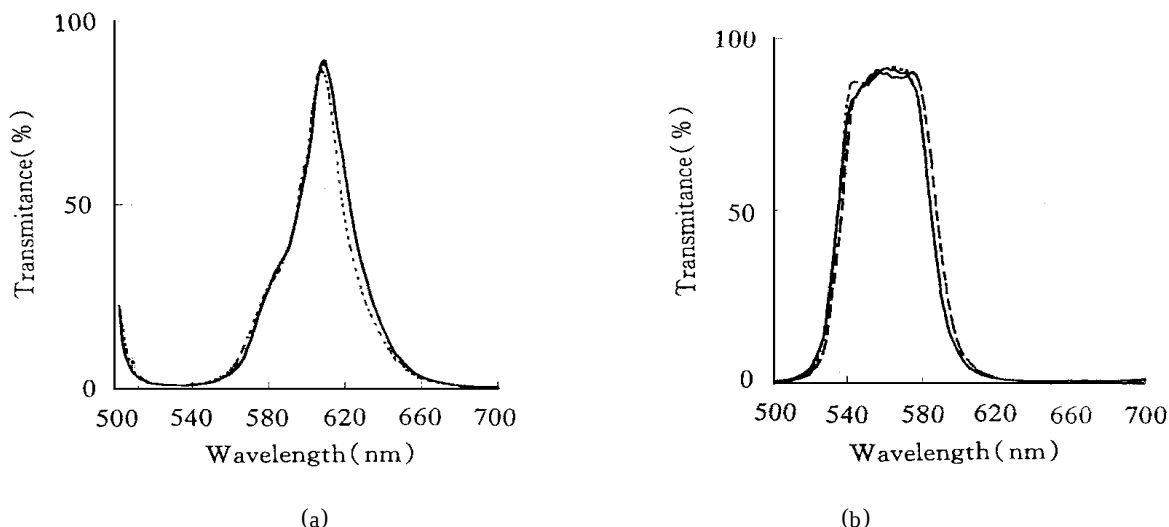


图 4 应用厚度修正挡板镀制滤光片的实测曲线 . (a) 平面工件盘; (b) 球缺工件盘

Fig 4 The measured curve of filter coated by closure for thickness revising.

(a)Workpiece pallet of plane; (b)Workpiece pallet of segment

65nm、95nm 处三个被镀片所测的三条光谱曲线. 图 4(b) 的曲线表明 65nm 和 95nm 处二块滤光片的光谱曲线基本重合在一起, 而 30nm 处的滤光片光谱曲线与它们相比较光谱曲线位移小于 1nm. 这些测量结果表明, 我们应用截流蒸气云静止挡板技术, 并采用透视法来设计厚度修正挡板, 可以使 DMD-450 型镀膜机的可镀面积内膜厚的分布达到均匀的要求, 可以极大地提高光学薄膜元件的质量和成品率. 因此, 本文所叙述的设计方法是一种比较简便、可靠、结果又十分理想的新设计方法.

我们从设计和实验中发现, 在设计厚度修正

挡板时应注意以下三点: 一是, 由计算机设计出来的厚度修正挡板, 只能使工件盘上的膜厚分布大体上达到均匀, 要想得到我们上面的实验结果, 或者更进一步要求各位置上被镀片的光谱曲线完全重合, 则必须通过多次实验, 微量修改厚度修正挡板的外形, 直至最后达到设计的要求. 二是, 静止厚度修正挡板放置的高度, 根据设计理论值, 也要在多次实验中作小范围的调整. 三是, 使用厚度修正挡板来镀制滤光片, 材料的蒸发速率要控制在适当的范围内, 蒸发速率太快或太慢都会对膜厚分布的均匀性有影响.

参考文献

- 1 Deppisch G Vacuum-Tech, 1981, 30(1): 67~ 100
- 2 普尔克尔 H K. 玻璃镀膜. 北京: 科学出版社, 1988: 177~ 194
- 3 颜培夫. 光学薄膜厚度修正性的理论计算. 激光与红外, 1985, 15(1): 47~ 50
- 4 席少霖, 赵凤治. 最优化计算方法. 上海科学技术出版社, 1983: 190~ 194

DESIGN OF CLOSURE FOR THICKNESS REVISING OF OPTICAL FILM

L in Jian, L in Yongzhong, L iao Q unfeng

Institute of laser, Fujian Normal University, Fuzhou 350007

Received date: 1999- 05- 31

Abstract A new design method of closure for thickness revising of optical coating is described in this paper. The techniques of still closure for catching vapor stream and perspective projection method of still closure are used to design closure for thickness revising of optical film. Furthermore, the results of design and experiment are put forward at last

Keywords Optical film; Closure for thickness revising; Perspective sciagraphy; Design



L in Jian was born in 1942 in Fuzhou. He graduated from the department of physics, Fudan University in 1966. Now he is an associate professor and works at the Institute of Laser, Fujian Normal University. His research areas cover theories of film optical, optical film device and its use.