

# 制备特定膜系的真空 镀膜平面挡板设计

金南善 李 春

**摘要** 用静止平面挡板遮挡蒸气流以改变基底膜厚分布的方法在真空镀膜中经常使用。本文从文献<sup>[1]、[2]</sup>中的膜厚分布的基本公式出发,分析研究了有关技术途径,并提出了适用于各类光学薄膜制备的平面静止挡板的设计。

## 一、前 言

在光学零件上要求真空镀制的薄膜具有均匀的厚度,或按特定比例分布,因此,真空镀膜中经常使用的遮挡蒸气流技术得到日益重视,并在很多光学薄膜制备中得到应用,如:大面积平面均匀镀层的获得;光学冷加工中的非球面的获得;渐变或跃变波长干涉滤光片的获得;光度衰减片;集成光学耦合器以及段波滤光片间接监控等等。这项技术仅采用有特定形状的静止挡板置于蒸发源与镀膜基底之间就能达到改变基底膜厚分布的目的。因此它具有工艺简单、使用方便、不改变镀膜机的任何结构等优点。但蒸镀过程中的蒸气流分布是复杂的,各种镀膜材料的蒸气流分布又有不同之处。本文从文献<sup>[1]、[2]</sup>中的膜厚分布的基本公式出发详细分析了有关工艺技术途径和涉及到的数学处理方法,提出了一种灵活方便,适用性强的静止平面挡板的设计方法,并举例说明了此方法的运用。

## 二、基 本 理 论

一般面蒸发源的发射气流分布具有所谓对称瓣形蒸气的特征,其淀积在镀膜基底上所形成的膜厚分布也有相应结果,因此通常它的蒸气发射特性接近于 $\cos^2\phi$ 分布<sup>[1]、[2]</sup>。如图1,其膜厚可表示为:

$$TS = m \cos^2\phi \cos Q / \pi \mu R^2 \quad (1)$$

其中: $\mu$ 为密度; $m$ 为蒸发材料的总质量; $\phi$ 为面源法线与连接蒸发源和镀膜表面元的

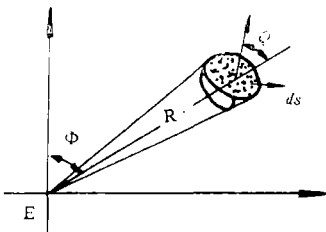


图1 角度对淀积厚度的影响

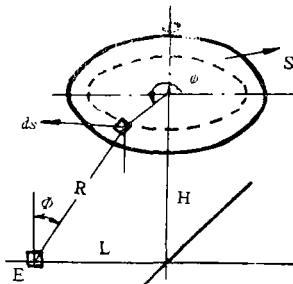


图2 旋转平面夹具

直线所构成的角度； $Q$ 为镀膜表面法线与连接蒸发源和镀膜表面元的直线所构成的角度； $E$ 为蒸发源。下面根据（1）式来讨论两种典型配置方式的膜层厚度分布。

### 1. 旋转平面夹具

与蒸发源平行的旋转平面夹具是最简单的情况，但这种夹具经常使用。如图2所示的旋转平面夹具，其几何关系为：

$$\begin{aligned} \cos(\phi) &= \cos(Q) = H/R \\ R^2 &= H^2 + L^2 + P^2 - 2LP\cos(\psi) \end{aligned} \quad (2)$$

把（2）式代入（1）式并积分得：

$$T = m/(\pi^2\mu) \int_0^\pi H^{n+1} / (H^2 + L^2 + P^2 - 2LP\cos(\psi))^{(n+3)/2} d\psi$$

基板中心的膜厚：

$$T_0 = \frac{m}{\pi^2\mu} \int_0^\pi \frac{H^{n+1} d\psi}{(H^2 + L^2)^{(n+3)/2}}$$

设： $K = (H + L + P)$

即、膜厚分布： $T/T_0 = \frac{(H^2 + L^2)^{(n+3)/2}}{\pi} \cdot \int_0^\pi \frac{d\psi}{(H^2 + L^2 + P^2 - 2LP\cos\psi)^{(n+3)/2}}$

令： $K_1 = [1 + (L/H)^2]^{(n+3)/2}$ ； $E = 1 + (P/H)^2 + (L/H)^2$ ； $F = 2LP/H^2$

得： $T/T_0 = \frac{K_1}{\pi} \int_0^\pi \frac{d\psi}{(E - F\cos\psi)^{(n+3)/2}} \sum_{i=1}^m \frac{K_i \cdot H_i}{2 \left[ E - F\cos\left(\frac{\pi}{2}(1+t_i)\right) \right]^{n+3/2}}$

式中 $H_i$ 和 $K_i$ 可在数学手册中查取。

### 2. 球面夹具

在实际中还常常采用旋转球面夹具，因为它适用于各种曲率半径的镜片，这只需把镜片表面视作球面夹具的一部分，然后对不同曲率半径的镜片选用对应的球面夹具即可。如图3表示球面夹具的配置，其几何关系为：

$$\begin{aligned} \cos(\phi) &= P\text{ctg}(\alpha)/R; \quad \cos(Q) = (R^2 - H^2 - L^2 + 2rH)/(2rR) \\ R^2 &= P^2/\sin^2(\alpha) + L^2 - 2PL\cos(\psi) \end{aligned} \quad (3)$$

令： $A = P^2/\sin^2(\alpha) + L^2$ ； $B = 2PL$

所以 $R^2 = A - B\cos(\psi)$

把（3）式代入（1）式并积分得：

$$T = \frac{m}{2\pi^2\mu} \int_0^\pi \frac{P^n \text{ctg}^n \alpha (R^2 - H^2 - L^2 + 2rH)}{rR^{(n+1)}} d\psi \quad (4)$$

基底中心膜厚为： $T_0 = \frac{mH^{n+1}}{\pi\mu(H^2 + L^2)^{(n+3)/2}}$

膜厚分布为： $T/T_0 = \frac{(H^2 + L^2)^{(n+3)/2}}{2\pi H^{(n+1)}} \int_0^\pi \frac{P^n \cdot \text{ctg}^n \alpha (R^2 - H^2 - L^2 + 2rH)}{rR^{(n+1)}} d\psi$

令： $K = \frac{(H^2 + L^2)^{(n+3)/2} \text{ctg}^n \alpha \cdot P^n}{2rH^{(n+1)}}$        $K_1 = A - H^2 - L^2 + 2rH$

$$T/T_0 = K/\pi \int_0^\pi \frac{(K_1 - B\cos\psi)}{(A - B\cos\psi)^{(n+3)/2}} d\psi \quad (4')$$

$$= \frac{K}{2} \sum_{i=1}^m \frac{\left[ K_1 - B \cos \left( \frac{\pi}{2} (1 + t_i) \right) \right] H_i}{\left[ A - B \cos \left( \frac{\pi}{2} (1 + t_i) \right) \right]^{(n+3)/2}}$$

$H_i$ 、 $K_i$ 可在数学手册中查取

在这里只讨论了平面夹具和球面夹具，如果是其它形状夹具，那么就根据具体情况分析图4是计算膜厚分布的程序框图。

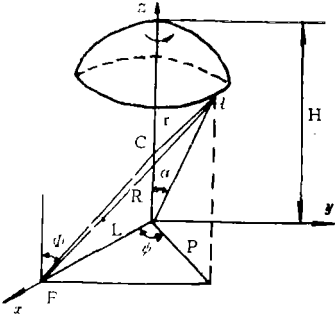


图3 旋转球面夹具

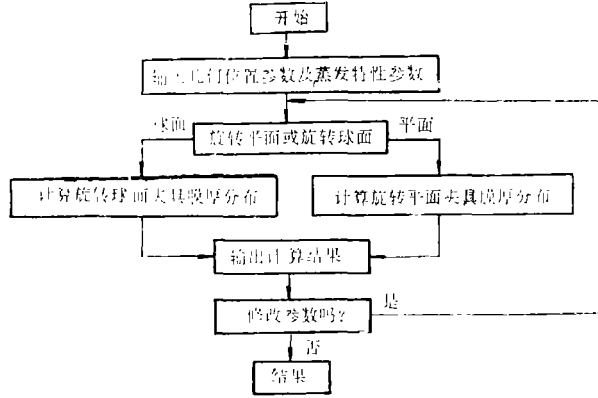


图4 计算膜厚分布的程序框图

### 三、静止平面挡板设计

通过上述推导出来的公式(4)、(4')就能设计出平面挡板，设挡板尺寸半径为P的镀点圆周轨迹的遮角为Q(P)，如图5，则平面夹具的膜厚分布为：

$$E(P) = \frac{K_1}{\pi} \int_{Q'(P)/2} \frac{dt}{(E - F \cos \psi)^{(n+3)/2}}$$

$$= \frac{Q'(P)}{4\pi} \sum_{i=1}^m \frac{H_i K_i}{[E - F \cos(Q'(P)/4(1+t_i))]^{(n+3)/2}} \quad (5)$$

球面夹具的膜厚分布为：

$$E(P) = \frac{K}{\pi} \int_{Q'(P)/2} \frac{K_1 - B \cos \psi}{(A - B \cos \psi)^{(n+3)/2}} d\psi$$

$$= \frac{Q'(P) \cdot K}{4\pi} \sum_{i=1}^m \frac{[K_1 - B \cos(Q'(P)/4(1+t_i))] H_i}{\left[ A - B \cos \left( \frac{Q'(P)}{4} (1+t_i) \right) \right]^{(n+3)/2}} \quad (6)$$

其中  $Q'(P) = 2\pi - Q(P)$ ，符号  $\int_{Q'(P)}$  表示积分从开口轨迹进行。从这个公式可以看到对不同的P适当地选择Q(P)，就可以控制T-P分布，这就是设计挡板的依据。图6是计算挡板边界曲线的程序框图。

通过图6框图我们可以看到，将基底上所要求的膜厚分布E(P)代入(5)和(6)式，就可以算出所要求的遮挡角Q(P)，Q(P)确定了，就能确定挡板的边界形状，Q(P)只是完成了紧邻基底挡板的边界形状设计，而挡板和基底之间是有一定距离的。设紧邻挡板边界曲线

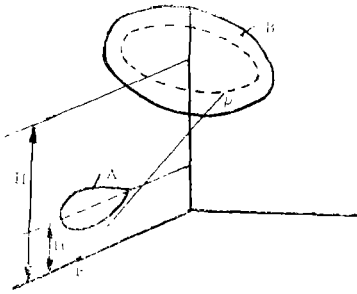


图5 A-挡板; B-托板; C-蒸发源

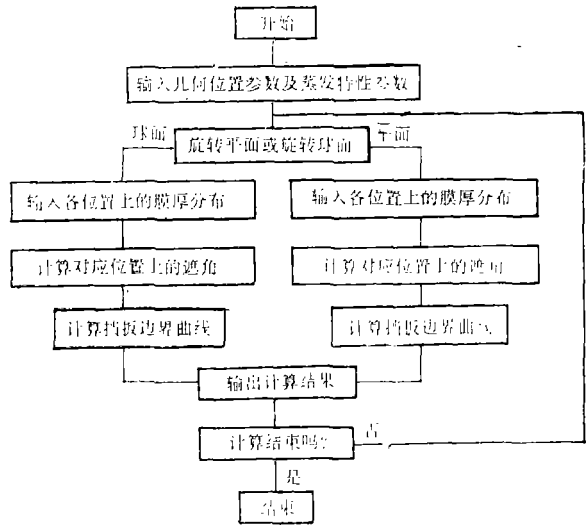


图6 计算挡板曲线的程序框图

的坐标为 $x$ 、 $y$ 、 $z$ ，静止挡板放置高度为 $H'$ ，以蒸发源中心为投影中心，将紧邻挡板投影到 $H'$ 平面，则根据解析几何关系得到静止挡板的边界曲线坐标为：

$$x_1 = (L - x)(1 - H'/z) + x, \quad y_1 = H'y/z$$

这些过程通过计算机完成。

在计算膜厚时选择蒸发的发射特性 $n$ 是非常重要的，它的取值不仅与蒸发源类型有关，而且与蒸发率、蒸发材料有关，如果蒸发材料存在控抗效应，则随着蒸发的继续， $n$ 会不断变化<sup>[3]</sup>。所以必须借助实验数据与理论计算的拟合来确定。方法是在实际的单层膜中，对同一面上不同 $P$ 处的基底膜厚进行测量，得到一组 $T-P$ 实验值，将它们与上面的公式计算值比较，用高斯—牛顿最小二乘法作最佳拟合判断可以精确确定 $n$ 。

#### 四、实例与分析

##### 1. 获得大面积平面均匀镀层的挡板设计

众所周知，镀制大面积平面镀件不容易得到膜厚均匀的镀层，我们为了解决这个问题，采取了静止挡板截流技术，它原则上可以无限扩大平面镀层均匀面积，而且可以明显提高镀膜质量和效率，只要给定膜厚分布 $E(P)$ ，就可以设计出挡板，即能达到目的，图7给出了设计结果，其中 $S$ 为蒸发源位置

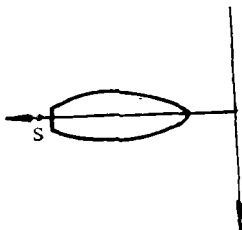


图7 挡板的边界曲线

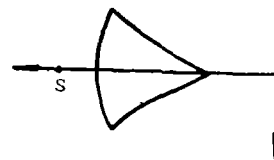


图8 挡板的边界曲线

$E_{(P)} = 0.9$ ;  $P = 0 \sim 100$ ;  $n = 3$ ;  $H = 225\text{mm}$ ;  $L = 120\text{mm}$ ;  $H' = 200\text{mm}$

## 2. 获得渐变波长滤光片的挡板设计

渐变波长干涉滤光片是一种具有中等分辨率的彩色分光元件,它要求多层膜系的中心波长随半径线性变化,膜厚呈劈形,所以膜系变化规律为:  $T_{(P)} = \frac{P - P_1}{P_2 - P_1} \cdot \frac{\lambda_2 - \lambda_1}{\lambda_0} + \frac{\lambda_1}{\lambda_0}$

其中 $P_1$ ,  $P_2$ 为起终半径,  $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$ 为相应中心波长,  $\lambda_0$ 为中心监控片中心波长。图8给出了设计结果,其中:  $P_1 = 30\text{mm}$ ;  $P_2 = 180\text{mm}$ ;  $\lambda_0 = 7\ 800\ \text{\AA}$ ;  $\lambda_1 = 4\ 000\ \text{\AA}$ ;  $\lambda_2 = 7\ 000\ \text{\AA}$ ;  $H = 225$ ;  $L = 120\text{mm}$ ;  $H' = 250$

我们也设计了加工非球面的挡板,但这样的非球面与球面之间的差值很小,如果差值较大就不能用镀膜方法制成。

总的来说,挡板的投影设计法通用性较强,精度为高,但实用中影响镀膜质量的因素较多,因此必须注意以下几点:

- (1) 工件托板与挡板必须相互平行;
- (2) 挡板的方位与中心必须对位;
- (3) 因 $n$ 值随蒸发条件的不同而略有变化,所以根据具体情况分析,变化较大时,必须针对具体条件选用挡板。

## 五、结 束 语

本文主要从理论出发,分析了设计静止平面挡板的方法以及静止挡板截流技术的有关工艺过程与技术细节,采用上述方法编制了计算膜厚分布程序,静止挡板的设计程序,并用这些程序设计的挡板成功地制造了各种径向渐变波长滤光片。

### 参 考 文 献

- [1] H·A·麦克劳德,周九林,尹树柏译,《光学薄膜技术》,国防工业出版社,(1974),323~399
- [2] 查立豫,林鸿海,《光学零件工艺学》,兵器工业出版社,1985,321~380
- [3] 顾培夫,《激光与红外》,1985,1,47~50

## The Design of Static Plane Shdtters for Special Optical Coating

Jin Nansan, Li Chun

### Abstract

From the basic expressions of distribution of film thickness on the substrate, we analyze the correlative techniques, and present designs of static plane shatters in order to obtain desired film thickness distribution in fabrication of optical coatings.