

行星夹具膜厚均匀性计算*

潘栋梁, 熊胜明, 张云洞, 王任华

(中科院光电技术研究所, 成都双流 350 信箱, 610209)

摘要: 建立了平板型和球面型行星夹具膜厚均匀性的计算模型。利用根据这些模型编制的计算程序计算了基板表面膜层厚度分布与蒸发源位置、蒸发源发射特性、夹具高度、行星轨半径以及行星夹具的倾角之间的关系。并得到了一组典型结果。

关键词: 薄膜; 均匀性; 计算

中图分类号: TH74

文献标识码: A

在镀制光学膜系的时候,膜厚均匀性问题是一个重要问题。膜厚的均匀性不好,将严重影响膜系的特性。膜厚均匀性是指膜厚随基板表面位置的变化而变化的情况,它与蒸发源与基板之间的配置以及蒸发源的蒸汽发射特性有关。有文献对平板、球面夹具以及旋转平板、球面夹具等情况的膜厚分布作了分析^[1,2],但对于行星夹具情况下的膜厚分布的计算却没有介绍。本文建立了计算行星夹具膜厚分布的数学模型,根据该模型计算得到了一组典型的结果。

1 行星夹具的膜厚分布的分析

基于蒸发分子与蒸发分子、蒸发分子与残余气体分子之间没有碰撞;蒸发分子到达基板表面后全部淀积成紧密的薄膜,其密度和大块材料相同;蒸发源的蒸汽发射特性不随时间变化这三个假定,可以对膜厚分布进行理论计算。基板上某一点 p 的膜厚可以表示为

$$t_p = C \frac{\cos^n \phi \cos \theta}{r^2} \quad (1)$$

其中 C 是常数; r 是该点到蒸发源的距离; ϕ 是蒸发源表面法线与 p 点和蒸发源连线的夹角, $\cos^n \phi$ 用来描述蒸发源的蒸汽发射特性^[3,4]; θ 是 p 点法线与 p 点和蒸发源连线的夹角。

由(1)式可知,影响膜层均匀性的因素主要有两点:基板上某点膜厚与它到蒸发源的距离平方成反比;膜厚与淀积角的余弦成正比。其作用结果使得镜片边缘膜层比中心处薄。而实际使用时,光线入射角增加会使中心波长向短波移动,为了满足入射角的影响,要求中心薄边缘厚,这与膜层的厚度分布是相反的。采用行星夹具进行镀膜,可以解决这个问题。图1和图2就是两种行星夹具配置方式。在这种夹具中,镀件不仅绕夹具的中心轴公转,而且以更大的转速各自绕其本身的中心轴自转,夹具每转一周,各镀件则旋转数周。为避免周期性的不均匀性,自转与公转的转速比应避开整数倍。采用行星夹具可以满足具有一定曲率和较高的均匀性要求。

对于行星夹具,需要将(1)式所表达的 t_p 对行星公转一周的范围进行积分平均,从而得到行星夹具的平均厚度表达式为

$$t_p = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} C \frac{\cos^n \phi \cos \theta}{r^2} d(\omega t) \quad (2)$$

ω 为夹具公转角速度, ωt 为转过的角度。

膜厚分布表示为表面任意点膜厚与中心点膜厚 t_0 之比

* 国家 863 激光技术领域资助课题
1999年12月9日收到原稿,2000年4月7日收到修改稿。
潘栋梁,男,1974年8月出生,硕士研究生

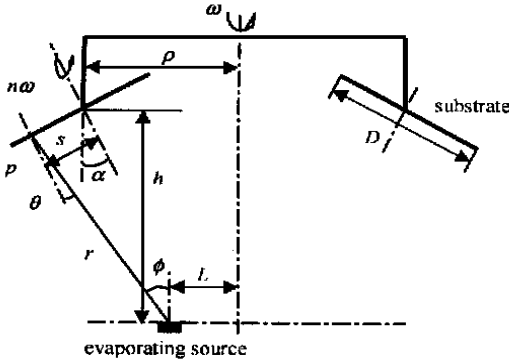


Fig 1 The flat planetary fixture setting
图 1 平板型行星夹具配置

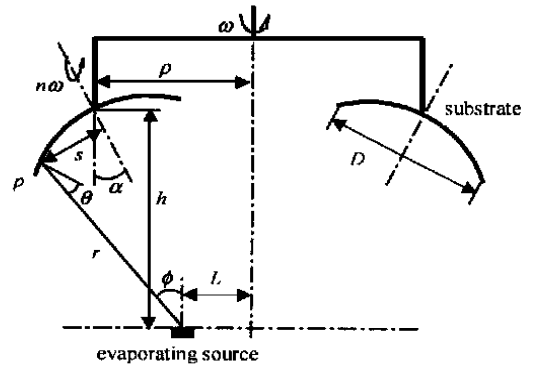


Fig 2 The spherical planetary fixture setting
图 2 球面型行星夹具配置

$$\frac{t_p}{t_0} = \frac{\int_0^{2\pi} \int_0^\pi \frac{\cos^n \phi \cos \theta}{r^2} d(\omega) d(\alpha)}{\int_0^{2\pi} \int_0^\pi \frac{\cos^n \phi \cos \theta}{r_0^2} d(\omega) d(\alpha)} = \frac{\int_0^{2\pi} \int_0^\pi \frac{\cos^n \phi \cos \theta}{r^2} d(\omega) d(\alpha)}{\int_0^{2\pi} \int_0^\pi \frac{\cos^n \phi \cos \theta}{r_0^2} d(\omega) d(\alpha)} \quad (3)$$

对于如图 1 所示的平板型行星夹具配置的情况, 利用空间解析几何或立体几何的知识, 可推导出对于基板上任意一点的几何关系

$$\left. \begin{aligned} \cos \theta &= \frac{[\rho - L \cos(\omega)] \sin \alpha + h \cos \alpha}{r}, & \cos \phi &= \frac{h - s \cos(k\omega) \sin \alpha}{r}, \\ r^2 &= \rho^2 + L^2 + h^2 - 2\rho L \cos(\omega) + s^2 + 2s(\rho - L \cos(\omega)) \cos(k\omega) \cos \alpha - \\ & 2L s \sin(\omega) \sin(k\omega) - 2h s \cos(k\omega) \sin \alpha \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中的 ω 是行星公转角速度; k 是自转角速度与公转角速度的比值, 故 $k\omega$ 就是行星自转角速度; ω 与 $k\omega$ 则表示转过的角度; s 是 p 点离开基板中心点的距离; ρ 是行星轨半径; L 是蒸发源离中心的距离; h 是夹具的垂直高度; α 为基板中心法线与垂直方向的夹角。

基板中心点 $s = 0$ 处, 这个关系简化为

$$\cos \theta_0 = \frac{[\rho - L \cos(\omega)] \sin \alpha + h \cos \alpha}{r_0}, \quad \cos \phi_0 = h/r_0, \quad r_0^2 = \rho^2 + L^2 + h^2 - 2\rho L \cos(\omega) \quad (5)$$

将(4)、(5)式代入(3)式便可得到平板型行星夹具的膜厚分布公式。

对于如图 2 所示的球面型行星夹具, 推导出了如下的关系式

$$\left. \begin{aligned} \cos \theta &= \frac{[\rho - L \cos(\omega)] \sin \alpha + h \cos \alpha}{r} + \frac{K[r^2 - \rho^2 - L^2 - h^2 + 2\rho L \cos(\omega)]}{4rD} \\ \cos \phi &= \frac{h' - s \cos(k\omega) \sin \alpha}{r} \\ r &= \rho^2 + L^2 + h^2 - 2\rho L \cos(\omega) + s^2 + 2s(\rho' - L \cos(\omega)) \cos(k\omega) \cos \alpha - \\ & 2L s \sin(\omega) \sin(k\omega) - 2h' s \cos(k\omega) \sin \alpha \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

其中

$$d = \begin{cases} \frac{2D}{K} - \sqrt{\left(\frac{2D}{K}\right)^2 - s^2}, & K \neq 0 \\ 0, & K = 0 \end{cases}$$

$$\rho' = \rho - d \sin \alpha$$

$$h' = h - d \sin \alpha$$

式中 D 、 K 分别是基板的口径和相对孔径, 当基板相对孔径为 0 时, 基板变成平板, 对应式中 $K = 0$ 的情

况, 不难看出此时式(6)与式(4)是一致的。

由于在平板型夹具和球面型夹具中, 基板中心的位置是没变的, 所以具有和(5)式相同的关系式。将(6)式和(5)式代入(3)式即得到球面型行星夹具的膜厚分布公式。

2 计算结果

根据以上推导的膜厚分布公式编制了计算程序, 对口径为 800mm 的行星夹具就转速比(公转比自转)为 1 5 的膜厚分布情况作了计算, 得到的计算结果如图 3 到图 8 所示, 图中的 n 表示蒸发源特性为 $\cos^n \phi$

图 3~ 图 5 是对平板型行星夹具计算的结果。图 3 是最大膜厚差与夹具高度 h 和蒸发源位置 L 的关系的二维曲线, 其中取 $\rho=600\text{mm}$, 假定蒸发源发射特性为 $\cos^2 \phi$ 型。从图中可以看出, 最大厚度差是随着 h/L 增大而减小, 从正厚度差变到负厚度差的。图 4 是在 $h=1400\text{mm}$ 、 $L=820\text{mm}$ 时最大厚度差与行星轨半径的关系, 大致是一种弧形的变化, 可以看出 $\rho=600\text{mm}$ 是一个优化的选择。图 5 是在优选参数 $\rho=600\text{mm}$ 时基板膜厚分布的情况。

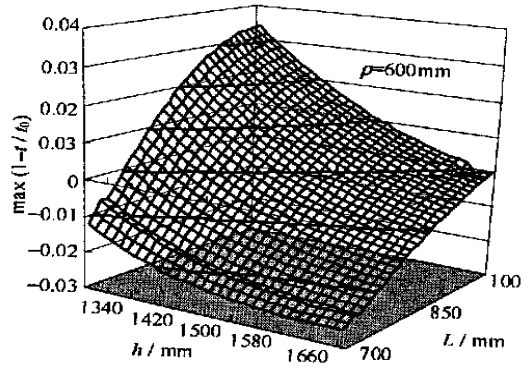


Fig 3 Relation of the maximum thickness deviation with fixture vertical location and evaporating source location of flat planetary fixture

图 3 平板型行星夹具最大膜厚差与夹具高度和蒸发源位置的关系

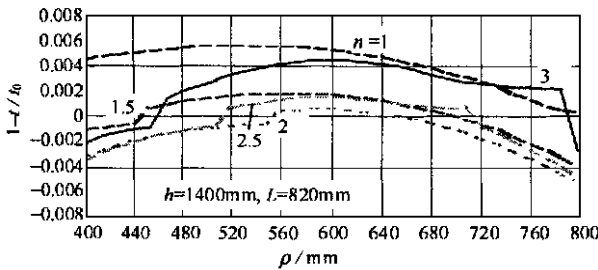


Fig 4 Relation of the maximum thickness deviation with planet orbit radius of flat planetary fixture

图 4 平板型行星夹具最大厚度差与行星轨半径的关系

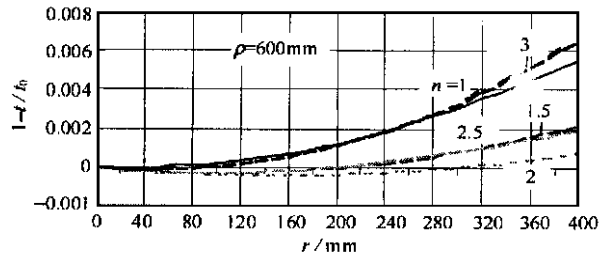


Fig 5 Film thickness distribution of flat planetary fixture

图 5 平板行星夹具表面膜厚分布情况

图 6~ 图 8 是对相对孔径为 1 3 的球面型行星夹具计算的结果。图 6 是最大膜厚差与夹具高度、蒸发源位置和行星轨半径的关系, 同样取 $\rho=600\text{mm}$, 假定蒸发源发射特性为 $\cos^2 \phi$ 型。图 7 是在 $h=1400\text{mm}$ 、 $L=820\text{mm}$ 时最大厚度差与行星轨半径的关系。图 8 是在优选参数 $\rho=600\text{mm}$ 、 $h=1400\text{mm}$ 、 $L=820\text{mm}$ 时基板膜厚分布的情况。从图中可以看出球面型行星夹具最大膜厚差与 h/L 的关系比较复杂, 而与行星轨半径的关系几乎是单调上升的。

在以上的计算中都取 $\alpha=60^\circ$; 这也是一个优选的参数, 当 α 变化时膜厚分布都会改变, 但对平板型行星夹具的影响更大。

3 结论

以 2 2 米镀膜机为例, 在该镀膜机上满足一定均匀性要求的夹具高度、蒸发源位置、行星轨半径等方面的参数, 经过计算和分析得到了以下最终结果:

(1) 对于旋转球面夹具, 在口径为 1600mm、相对口径为 1 3 情况下要求满足最大膜厚差不大于 2%。可取 $L=970\text{mm}$, 而 h 必须随蒸发源发射特性 ($\cos^n \phi$) 而变:

n	3	2.5	2.0	1.5	1.0
h/mm	1560	1500	1450	1400	1300

(2) 对于口径为 800mm 的行星夹具, 取行星轨半径 $\rho = 600\text{mm}$ 、夹具高度范围 $h = 1400$ 、 $L = 820\text{mm}$, 无论平板型还是球面型, 在蒸发源发射次数 1.5~3 之间最大膜厚差都可以不大于 0.5%。

(3) 对于平板型行星夹具满足(2)式要求的 α 范围在 $53^\circ \sim 70^\circ$ 之间。对于球面型行星夹具满足(2)式要求的 α 范围在 $43^\circ \sim 64^\circ$ 之间。

实际镀膜时影响膜厚分布的原因很多很复杂, 并且各因素互相制约、互相联系, 必须经过多次实际测量、分析、实验和调整, 才可能得到良好的膜厚均匀性。

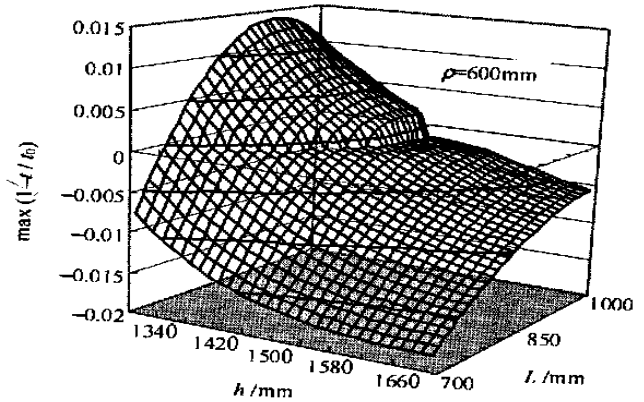


Fig 6 Relation of the maximum thickness deviation with fixture vertical location and evaporating source location of spherical planetary fixture

图 6 球面型行星夹具最大膜厚差与夹具高度和蒸发源位置的关系

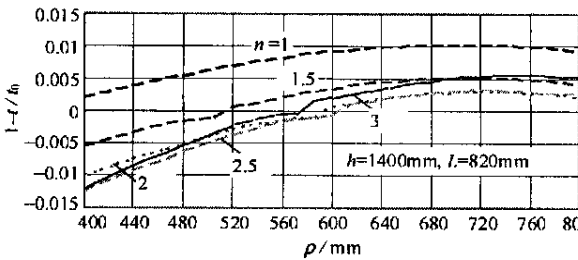


Fig 7 Relation of the maximum thickness deviation with planet orbit radius of spherical planetary fixture
图 7 球面型行星夹具最大厚度差与行星轨半径的关系

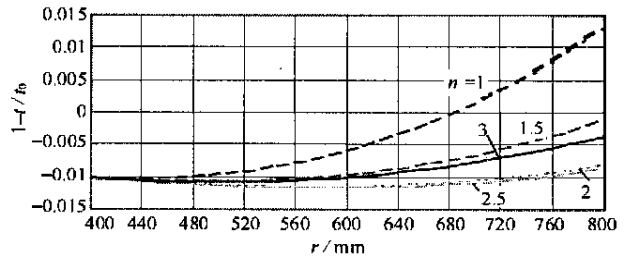


Fig 8 Film thickness distribution of spherical planetary fixture
图 8 球面型行星夹具表面厚度分布情况

参考文献:

[1] 顾培夫 薄膜技术[M] 杭州: 浙江大学出版社, 1990
 [2] Musset A and Stevenson I.C. Thickness distribution of evaporated films[A] in *Optical Thin Films and Applications*, R. Hermann, ed Proc SPIE[C], 1990, 1270: 287~ 291.
 [3] 顾培夫 光学薄膜厚度均匀性的理论计算[J], 激光与红外, 1985, (1): 47~ 50
 [4] Francisco Villa, Octavio Pompa Emission pattern of real vapor sources in high vacuum: an overview [J] *Applied Optics*, 1999, 38 (4): 695~ 703

FLM UNIFORMITY CALCULATION OF LARGE CALIBER COATING MACHINE

PAN Dong-liang, X DNG Sheng-ming, ZHANG Yun-dong, WANG Ren-hua

Institute of Optics & Electronics, Chinese Academy of Science, P. O. Box 350 Shuangliu, Chengdu 610209, PRC

ABSTRACT: Calculating models for flat and spherical planetary fixture were developed. Based on these models, programs were developed to calculate and analyze the film thickness distribution on these type substrates as a function of evaporating source's location, emissive characteristic of the source, the vertical height of fixture and the radius of planetary orbit. Representative results were given here.

KEY WORDS: film; uniformity; calculation