

光学学报

三级公自转行星系统中弯月透镜表面膜厚均匀性的研究

张静¹, 陈延涵^{1*}, 朱忠尧², 付秀华¹, 张功¹, 齐双阳¹, 常艳贺¹, 杨飞³, 金海俊⁴, 陆致远⁴

¹ 长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022;

² 北京空间机电研究所, 北京 100094;

³ 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

⁴ 光驰科技(上海)有限公司, 上海 200444

摘要 为提高弯月透镜表面的膜厚均匀性,对三级公自转行星系统中弯月透镜表面进行了膜厚均匀性的研究。构建了三级公自转行星盘的运动轨迹方程,并根据膜厚计算公式,建立了与三级盘倾角、公转半径有关的弯月透镜表面相对膜厚分布模型,采用电子束蒸发和离子束辅助沉积技术对分布模型进行了实验验证。此外,根据多次实验结果优化三级公自转行星系统结构参数,以提高弯月透镜表面的膜厚均匀性。实验结果表明,在未使用修正挡板技术的情况下,当公转半径为 650 mm、倾角为 60°时,可将弯月透镜凸面表面膜厚均匀性控制在±2.45%以内。

关键词 薄膜; 三级公自转行星系统; 相对膜厚分布模型; 弯月透镜; 膜厚均匀性

中图分类号 O484

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS202242.1031002

Uniformity of Surface Film Thickness of Meniscus Lens in Third-Order Common Rotation Planetary System

Zhang Jing¹, Chen Yanhan^{1*}, Zhu Zhongyao², Fu Xiuhua¹, Zhang Gong¹, Qi Shuangyang¹, Chang Yanhe¹, Yang Fei³, Jin Haijun⁴, Lu Zhiyuan⁴

¹ School of Opto-Electronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, Jilin, China;

² Beijing Space Electromechanical Research Institute, Beijing 100094, China;

³ Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, Jilin, China;

⁴ OPTORUN (Shanghai) Co., Ltd., Shanghai 200444, China

Abstract In order to improve the film thickness uniformity of the meniscus lens surface, the film thickness uniformity of the meniscus lens surface in the third-order common rotation planetary system is studied. The motion trajectory equation of the third-order common rotation planetary disk is constructed. According to the film thickness calculation formula, the relative film thickness distribution model of meniscus lens surface is established which is related to the dip and revolution radius of the third-order disk. The distribution model is verified experimentally by electron beam evaporation and ion beam assisted deposition. In addition, the structural parameters of the third-order common rotation planetary system are optimized according to the multi-experimental results to improve the film thickness uniformity of the meniscus lens surface. The experimental results show that when the rotation radius is 650 mm and dip is 60°, the film thickness uniformity of the convex surface of the meniscus lens can be controlled within ±2.45% without using the correction bezel technology.

Key words thin films; three-order common rotation planetary system; relative film thickness distribution model; meniscus lens; film thickness uniformity

收稿日期: 2021-10-25; 修回日期: 2021-12-04; 录用日期: 2021-12-13

基金项目: 吉林省科技发展计划国际科技合作项目(20210402065GH)、中国科学院青年创新促进会优秀会员(Y202053)、中国科学院合作伙伴计划(171722KYSB20200001)、国家自然科学基金(11973040)

通信作者: *1479254374@qq.com

1 引言

当前,弯月透镜在现代光学系统中的应用很广泛,在其表面镀制一定厚度的光学薄膜,可以提高透镜表面的光谱性能^[1-3]。

对弯月透镜而言,光线入射角增加会使中心波长向短波漂移,这就要求弯月透镜的膜厚分布尽可能地满足中心薄边缘厚的要求。然而,当采用平面夹具对弯月透镜表面镀膜时,弯月透镜的表面面形会使弯月透镜表面膜层中心厚边缘薄,导致弯月透镜表面膜厚均匀性较差^[1-4]。膜厚均匀性是指膜厚随着基板表面位置变化而变化的情况。膜厚均匀性不好会使光谱发生漂移,还会在光学元件上造成像差,引起成像位置模糊、偏移等现象的出现^[3-4]。

目前,国内外在旋转平面夹具、球面夹具和二级行星系统中透镜表面膜厚均匀性方面已经有了较多的研究,并且取得了一定的成果^[5-13]。Oliver 等^[1]通过模拟二级行星系统中基板的运动轨迹,分析出了二级行星系统膜厚均匀性优于其他旋转系统的原因,给出了主动轴与被动轴的旋转比,最终可将 500 mm 范围内的膜厚不均匀度降低到 1%。樊彦峥等^[10]针对旋转平面夹具,分析了夹具高度 H 、蒸发源与真空室中心轴距离 L 对铝膜膜厚均匀性的影响。同时,设计了合适的修正挡板,将膜厚不均匀度改善到了 3.9%。潘永刚等^[11]研究了旋转球面夹具系统的膜厚分布,并通过建立的数学模型求解出了修正板的形状大小,最终可将 Ta_2O_5 单层膜的膜厚不均匀度控制在 0.6% 以内。朱元强^[12]对二级行星系统进行了膜厚理论研究,运用代入法计算出了半球面上典型点的膜厚分布,结果表明,半球面上中心区域(90° 张角内)的膜厚不均匀性可控制在 10% 左右。然而,在三级公自转行星系统中对透镜表面膜厚均匀性的研究却鲜有报道。因此,在三级公自转行星系统中对透镜表面膜厚均匀性进行研究是十分有必要的。

本文建立了弯月透镜表面膜厚分布与三级盘倾角、公转半径等条件之间的膜厚分布模型。根据膜厚分布模型仿真,可获得较好膜厚均匀性的空间位置。同时,在光驰 OTFCX 型三级公自转行星真空镀膜机上,对弯月透镜表面镀制单层 Ti_3O_5 薄膜进行了实验验证。

2 基本原理

2.1 三级公自转行星系统相对膜厚分布模型的构建

三级公自转行星运动模型如图 1 所示。以腔体

底部中心 O 点为原点,水平向右为 X 轴,水平向内为 Y 轴,竖直向上为 Z 轴,建立三维空间坐标系。处于最下方的三级盘不仅本身要顺时针自转运动,还要随着二级盘的逆时针自转而运动。同时,二三级盘的整体还围绕着公共轴逆时针公转运动。公自转的周期分别为 T_1 、 T_2 、 T_3 。蒸发源距腔体中心 O 点的距离是 L ,二级盘的公转半径是 d ,二级盘中心与腔体底部的垂直距离是 h 。

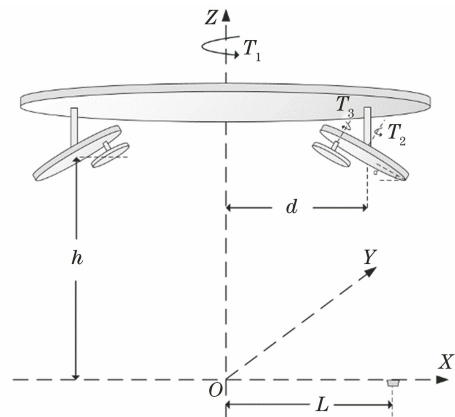


图 1 三级公自转行星运动轨迹模型

Fig. 1 Motion trajectory model of third-order common rotation planetary

将三级公自转行星系统整体拆分处理,如图 2 所示。假定二三级盘整体水平放置在腔体的中心 O 点处, O 点与 E 点分别是二、三级盘的中心, F 点是三级盘边缘与 X 轴的一个交点, G 点是 E 点与 F 点之间的任意一点, R 是二级盘中心与三级盘中心的距离, R_3 是三级盘半径, r_3 是 E 点与 G 点之间的距离, ω_3 是三级盘的自转角速度。为将二三级盘整体移动到实际位置需要有以下步骤。

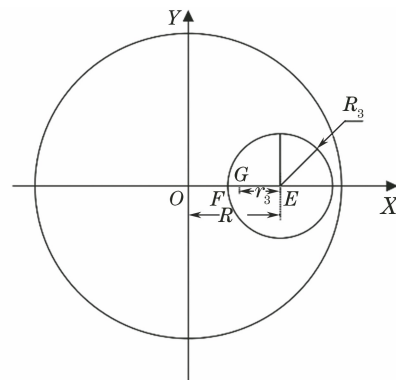


图 2 初始坐标模型

Fig. 2 Initial coordinate model

当只有三级盘在自转运动时, G 点坐标 (x_1, y_1, z_1) 与时间 t 的关系为

$$\begin{cases} x_1 = -r_3 \cos(\omega_3 t) + R \\ y_1 = r_3 \sin(\omega_3 t) \\ z_1 = 0 \end{cases} \quad (1)$$

三级盘在自转的同时,会随着二级盘的自转而运动,二级盘的自转角速度为 ω_2 ,利用三维旋转矩阵可求得此时 G 点坐标 (x_2, y_2, z_2) 与时间 t 之间的关系,即

$$\begin{cases} x_2 = x_1 \cos(\omega_2 t) - y_1 \sin(\omega_2 t) \\ y_2 = x_1 \sin(\omega_2 t) + y_1 \cos(\omega_2 t), \\ z_2 = 0 \end{cases} \quad (2)$$

再将二三级盘整体绕 Y 轴逆时针方向旋转,使二三级盘整体倾斜 α 角(二三级盘整体与水平面的夹角),利用三维旋转矩阵可求得此时的 G 点坐标 (x_3, y_3, z_3) ,即

$$\begin{cases} x_3 = x_2 \cos \alpha + z_2 \sin \alpha \\ y_3 = y_2 \\ z_3 = -x_2 \sin \alpha + z_2 \sin \alpha \end{cases} \quad (3)$$

由于 $z_2 = 0$,故

$$\begin{cases} x_3 = x_2 \cos \alpha \\ y_3 = y_2 \\ z_3 = -x_2 \sin \alpha \end{cases} \quad (4)$$

为表述清晰,现将弯月透镜图暂画为平凸透镜。将弯月透镜放置在三级盘的边缘,如图 3 所示。以基片凸面的一条圆弧为例, M 点是圆弧中点, N 点是圆弧上任意一点, Q 点是凸面的球心, T 点是 QM 与 EF 的交点, G 点是 N 点在三级盘上的投影, Δh 是 N 点和 G 点之间的距离。张角 σ 是球心点 Q 与圆弧中点 M 的连线和球心点 Q 与 N 点连线之间的夹角,且以 QM 之间的连线为起点顺时针方向为正,逆时针方向为负。凸面半张角的大小为 β ,半径为 r 。

由几何关系易知 Δh 为

$$\Delta h = r \cos \sigma - r \cos \beta, \quad (5)$$

E 点与 G 点之间的距离 r_3 与其他参数之间的关系为

$$r_3 = R_3 - (r \sin \beta - r \sin \sigma), \quad (6)$$

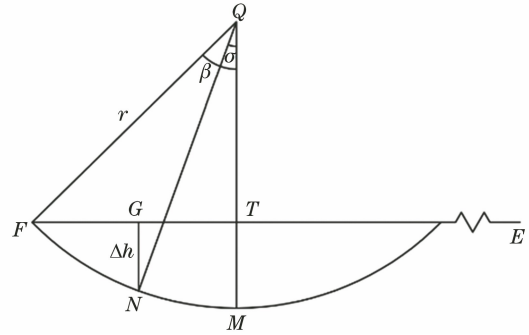


图 3 平凸透镜在三级盘的位置

Fig. 3 Position of plane-convex lens in third-order disk

由 G 点的坐标 (x_3, y_3, z_3) 可推出该圆弧上 N 点的坐标 (x', y', z') 为

$$\begin{cases} x' = x_3 - \Delta h \sin \alpha \\ y' = y_3 \\ z' = z_3 - \Delta h \cos \alpha \end{cases} \quad (7)$$

将二三级盘整体沿 X 轴正方向平移距离 d ,此时 N 点的坐标 (x_4, y_4, z_4) 为

$$\begin{cases} x_4 = x' + d \\ y_4 = y' \\ z_4 = z' \end{cases} \quad (8)$$

加入公转(二三级盘整体绕 Z 轴逆时针旋转),公转角速度为 ω_1 ,利用三维旋转矩阵求得此时 N 点的坐标 (x_5, y_5, z_5) 与时间 t 的关系为

$$\begin{cases} x_5 = x_4 \cos(\omega_1 t) - y_4 \sin(\omega_1 t) \\ y_5 = x_4 \sin(\omega_1 t) + y_4 \cos(\omega_1 t). \\ z_5 = z_4 \end{cases} \quad (9)$$

将二三级盘整体向上平移 h ,便可得到三级公自转行星系统中弯月透镜凸面基片表面任一点 $N(x_N, y_N, z_N)$ 的轨迹方程,即

$$\begin{cases} x_N = x_5 \\ y_N = y_5 \\ z_N = z_5 + h \end{cases} \quad (10)$$

至此,已将二三级盘整体移动到实际位置,再进一步整理可得

$$\begin{cases} x_N = [R - r_3 \cos(\omega_3 t)] [\cos(\omega_1 t) \cos(\omega_2 t) \cos \alpha - \sin(\omega_1 t) \sin(\omega_2 t)] - \\ r_3 \sin(\omega_3 t) [\cos(\omega_1 t) \sin(\omega_2 t) \cos \alpha + \sin(\omega_1 t) \cos(\omega_2 t)] - r \cos(\omega_1 t) \sin \alpha (\cos \sigma - \cos \beta) + d \cos(\omega_1 t) \\ y_N = [R - r_3 \cos(\omega_3 t)] [\cos(\omega_2 t) \sin(\omega_1 t) \cos \alpha + \cos(\omega_1 t) \sin(\omega_2 t)] - \\ r_3 \sin(\omega_3 t) [\sin(\omega_1 t) \sin(\omega_2 t) \cos \alpha - \cos(\omega_1 t) \cos(\omega_2 t)] - r \sin(\omega_1 t) \sin \alpha (\cos \sigma - \cos \beta) + d \sin(\omega_1 t) \\ z_N = r_3 \sin(\omega_2 t) \sin(\omega_3 t) \sin \alpha - \cos(\omega_2 t) \sin \alpha [R - r_3 \cos(\omega_3 t)] - r \cos \alpha (\cos \sigma - \cos \beta) + h \end{cases} \quad (11)$$

当 N 点运动到 M 点时,可得

$$\begin{cases} \sigma = 0^\circ \\ r_M = r_Q = R_3 - r \sin \beta \end{cases} \quad (12)$$

式中: r_M, r_Q 都是 E 点与 T 点之间的距离。此时, $M(x_M, y_M, z_M)$ 点的轨迹方程为

$$\begin{cases} x_M = [R - r_M \cos(\omega_3 t)] [\cos(\omega_1 t) \cos(\omega_2 t) \cos \alpha - \sin(\omega_1 t) \sin(\omega_2 t)] - \\ r_M \sin(\omega_3 t) [\cos(\omega_1 t) \sin(\omega_2 t) \cos \alpha + \sin(\omega_1 t) \cos(\omega_2 t)] - r \cos(\omega_1 t) \sin \alpha (1 - \cos \beta) + d \cos(\omega_1 t) \\ y_M = [R - r_M \cos(\omega_3 t)] [\cos(\omega_2 t) \sin(\omega_1 t) \cos \alpha + \cos(\omega_1 t) \sin(\omega_2 t)] - \\ r_M \sin(\omega_3 t) [\sin(\omega_1 t) \sin(\omega_2 t) \cos \alpha - \cos(\omega_1 t) \cos(\omega_2 t)] - r \sin(\omega_1 t) \sin \alpha (1 - \cos \beta) + d \sin(\omega_1 t) \\ z_M = r_M \sin(\omega_2 t) \sin(\omega_3 t) \sin \alpha - \cos(\omega_2 t) \sin \alpha [R - r_M \cos(\omega_3 t)] - r \cos \alpha (1 - \cos \beta) + h \end{cases} \quad (13)$$

同理, 也可求得弯月透镜凸面球心点 $Q(x_Q, y_Q, z_Q)$ 的轨迹方程, 即

$$\begin{cases} x_Q = [R - r_Q \cos(\omega_3 t)] [\cos(\omega_1 t) \cos(\omega_2 t) \cos \alpha - \sin(\omega_1 t) \sin(\omega_2 t)] - \\ r_Q \sin(\omega_3 t) [\cos(\omega_1 t) \sin(\omega_2 t) \cos \alpha + \sin(\omega_1 t) \cos(\omega_2 t)] + r \cos(\omega_1 t) \sin \alpha (1 - \cos \beta) + d \cos(\omega_1 t) \\ y_Q = [R - r_Q \cos(\omega_3 t)] [\sin(\omega_1 t) \cos(\omega_2 t) \cos \alpha + \cos(\omega_1 t) \sin(\omega_2 t)] - \\ r_Q \sin(\omega_3 t) [\sin(\omega_1 t) \sin(\omega_2 t) \cos \alpha + \cos(\omega_1 t) \cos(\omega_2 t)] + r \sin(\omega_1 t) \sin \alpha (1 - \cos \beta) + d \sin(\omega_1 t) \\ z_Q = r_Q \sin(\omega_2 t) \sin(\omega_3 t) \sin \alpha - \cos(\omega_2 t) \sin \alpha [R - r_Q \cos(\omega_3 t)] + r \cos \alpha (1 - \cos \beta) + h \end{cases} \quad (14)$$

接着, 构建出旋转锥形夹具下的膜厚公式。假定镀膜时: 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; 电子束蒸发源的蒸气发射特性不随时间变化^[3-4]。基于上述假定, 在蒸发源的形状与基板之间的相对位置确定后, 就能计算出膜厚度分布情况^[13-15]。旋转锥形散架结构示意图如图 4 所示。

锥形夹具上任意一点 $P(x, y, z)$ 的膜厚公式可表示为

$$D(x, y, z) = \frac{(n+1)m}{2\pi\rho} \cdot \frac{1}{\gamma^2} \cos^n \varphi \cdot \cos \theta, \quad (15)$$

式中: ρ 是膜的密度; n 是蒸发源蒸气参数; m 是材料的总质量; φ 是面源法线与连接蒸发源和镀膜表面元的直线所构成的角度; θ 是镀膜表面法线与连接蒸发源和镀膜表面元 P 点之间的直线所构成的角度; γ 是蒸发源与镀膜点源之间的距离; L 是蒸发

源与腔体中心之间的距离。

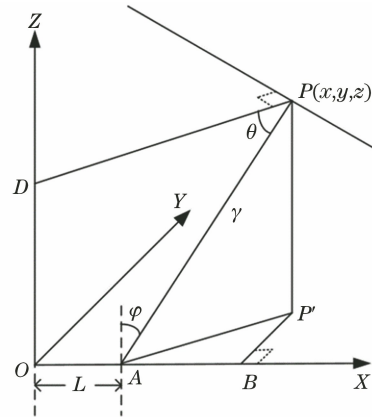


图 4 旋转锥形散架结构

Fig. 4 Rotating taper frame structure

利用空间解析几何的知识, 可以将锥形夹具上任意一点 P 的膜厚 $D(x, y, z)$ 进一步表示为

$$D(x, y, z) = \frac{(n+1)m}{2\pi\rho} z^n \left[\frac{1}{(x-L)^2 + y^2 + z^2} \right]^{\frac{n+2}{2}} \cos \theta, \quad (16)$$

将弯月透镜凸面固定在 P 点, $\cos \theta$ 用向量关系可表示为

$$\cos \theta = \frac{(L - x_N)(x_N - x_Q) - y_N(y_N - y_Q) - z_N(z_N - z_Q)}{r \sqrt{(x_N - L)^2 + y_N^2 + z_N^2}}, \quad (17)$$

将式(17)代入式(16)中得到在锥形夹具下弯月透镜凸面表面任一点 N 的膜厚公式, 即

$$D_N(x_N, y_N, z_N) = \frac{(n+1)m}{2\pi\rho} z_N^n \left[\frac{1}{(x_N - L)^2 + y_N^2 + z_N^2} \right]^{\frac{n+2}{2}} \frac{(L - x_N)(x_N - x_Q) - y_N(y_N - y_Q) - z_N(z_N - z_Q)}{r \sqrt{(x_N - L)^2 + y_N^2 + z_N^2}}. \quad (18)$$

相对膜厚分布可表示为不同张角处的膜厚值 T_N 与圆弧中心点的膜厚值 T_M 之比,即

$$\frac{T_N}{T_M} = \frac{\int_{t=0}^{t=j} D_N(x_N, y_N, z_N) dt}{\int_{t=0}^{t=j} D_M(x_M, y_M, z_M) dt}, \quad (19)$$

式中: j 为镀膜时间, j 取较大值可避免偶然性。对于弯月透镜凸面内的遮挡情况,用 θ 角的余弦值来限制,对被遮挡的点位取 $\cos \theta < 0$ 。将式(11)~(14)和式(18)代入式(19)中,可构建弯月透镜凸面表面相对膜厚分布模型。

2.2 三级公自转行星系统相对膜厚分布的模拟仿真

如图 1 所示, 4 种可调公转半径 d 分别是 570, 650, 700, 740 mm, 二级盘高度为 $h = 1050$ mm, 蒸发源到腔体中心的距离为 $L = 560$ mm, 三级盘半径为 $R_3 = 120$ mm, 二级盘与一级盘的旋转周期比为 $T_2/T_1 = 3.2$, 三级盘与一级盘的旋转周期比为 $T_3/T_1 = 10.2$ 。其中, 一级盘转速为 5.9 r/min, 二级盘转速为 18.8 r/min, 三级盘转速为 60.0 r/min。弯月透镜由树脂材料构成, 尺寸如图 5 所示, 其中 R_0 为弯月透镜凹面半径, β_0 为半张角。

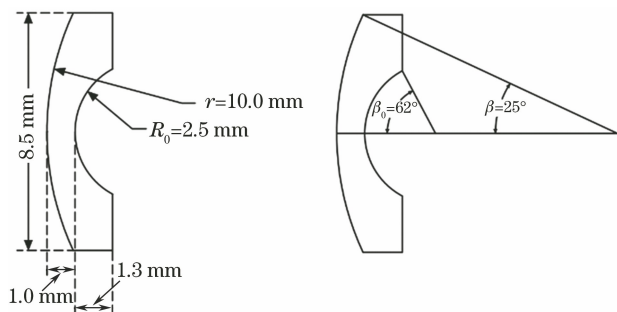


图 5 弯月透镜尺寸

Fig. 5 Meniscus lens dimensions

现将三级公自转行星系统的配置参数和弯月透镜的尺寸代入相对膜厚分布模型中,并通过此模型计算得出弯月透镜凸面表面的相对膜厚数据,经处理后可得到图 6 所示的膜厚分布等高线颜色填充图。

图 6 横坐标表示公转半径 d 的大小,纵坐标表

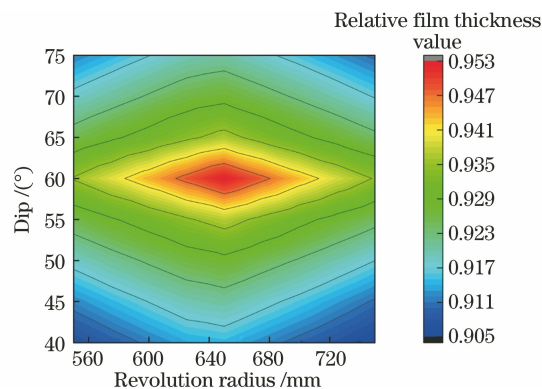


图 6 膜厚分布等高线颜色填充图

Fig. 6 Color filling diagram of film thickness distribution contour line

示三级盘倾角 α 的大小,不同的颜色代表不同的相对膜厚值(相对膜厚值为圆弧张角为 20° 处的膜厚值与圆弧中心点的膜厚值之比)。相对膜厚值越接近 1 表明膜厚均匀性越好。从图 6 中可分析出:公转半径 d 与倾角 α 都对弯月透镜凸面表面相对膜厚分布有一定影响;当倾角 α 不变,公转半径 d 从 550 mm 增加到 750 mm 时,相对膜厚值先增大后减小,在公转半径为 $d = 650$ mm 附近处相对膜厚值最大;当公转半径 d 不变,倾角 α 从 40° 增加到 75° 时,相对膜厚值先增大后减小,在倾角为 $\alpha = 60^\circ$ 附近处相对膜厚值最大。从图 6 中还可以看出,当公转半径 d 在 570~740 mm、三级盘倾角 α 在 $50^\circ \sim 70^\circ$ 之间时,弯月透镜凸面的相对膜厚值能达到较好的水平。

3 实验结果与讨论

实验是在光驰 OTFC1800X 型三级公自转行星真空镀膜机上完成的,该设备配有双扩散泵真空系统、MXC-3 膜林膜厚控制仪、6 位晶控探头、2 个 c 型电子枪、BST 反射电子捕捉器和射频离子源。选用的镀膜材料是 Ti_3O_5 ,使用的镀膜工艺如表 1 所示。其中,IBS 为射频离子源,ACC 为离子源的加速电压, E/B 为中和器与离子源的电流之比。

表 1 Ti_3O_5 单层膜的蒸镀工艺参数

Table 1 Evaporation process parameters of Ti_3O_5 monolayer film

| Material | IBS | | | | Flow rate of O_2 in IBS / (mL·min ⁻¹) | Flow rate of Ar in IBS / (mL·min ⁻¹) | Flow rate of Ar in neutralizer / (mL·min ⁻¹) | Temperature / °C |
|-----------|-------------|--------------|---------|--------------------|---|--|--|------------------|
| | Voltege / V | Current / mA | ACC / V | $\frac{E}{B} / \%$ | | | | |
| Ti_3O_5 | 500 | 450 | 600 | 150 | 75 | 10 | 8 | 80 |

现将弯月透镜固定在三级盘的中心,将公转半径 d 分别调至 570, 650, 700, 740 mm, 再依次将三级盘的倾角 α 调节为 $50^\circ, 60^\circ, 70^\circ$, 使用表 1 的镀膜工艺在弯月透镜的凸面镀制一层 500 nm 厚的 Ti_3O_5 薄膜, 以研究弯月透镜表面膜厚分布情况。

3.1 反射光谱曲线图

根据表 1 所示实验条件, 在光驰 OTFC1800X

型三级公自转行星真空镀膜机上进行实验。使用显微分光仪(LRMS)对镀完膜后的弯月透镜表面的反射光谱进行测量, 测量精度均在千分位。图 7~10 分别是当公转半径为 570, 650, 700, 740 mm 时, 改变倾角 α 得到的反射光谱曲线图。其中: σ_0 是弯月透镜凸面中心点的反射曲线; $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ 是弯月透镜凸面表面张角为 20° 处所取的 3 个样品点的反射曲线。

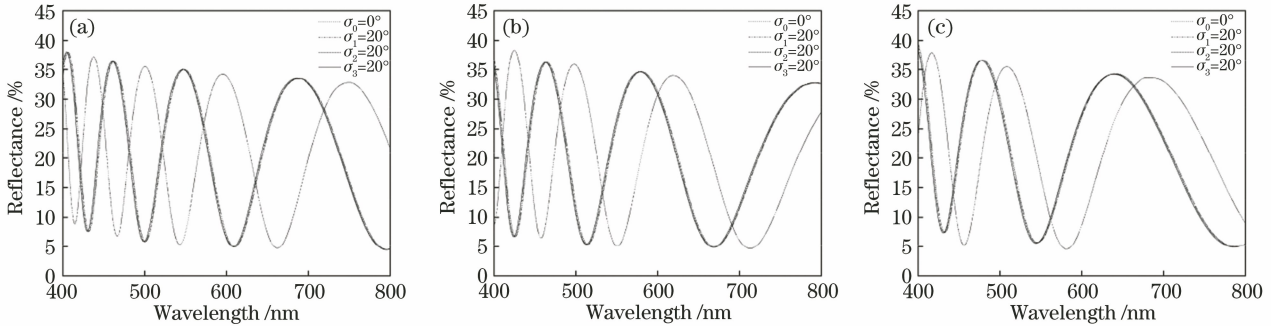


图 7 $d=570$ mm 时不同倾角条件下的反射曲线。(a) $\alpha=50^\circ$; (b) $\alpha=60^\circ$; (c) $\alpha=70^\circ$

Fig. 7 Reflection curves under different dips when $d=570$ mm. (a) $\alpha=50^\circ$; (b) $\alpha=60^\circ$; (c) $\alpha=70^\circ$

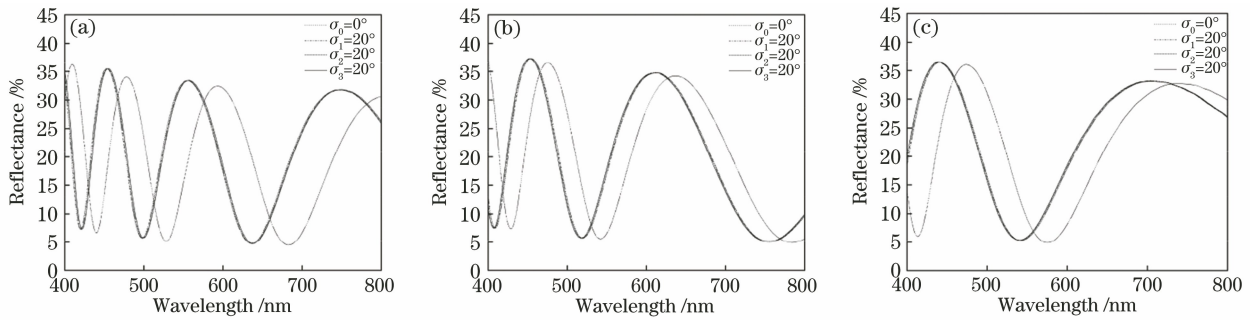


图 8 $d=650$ mm 时不同倾角条件下的反射曲线。(a) $\alpha=50^\circ$; (b) $\alpha=60^\circ$; (c) $\alpha=70^\circ$

Fig. 8 Reflection curves under different dips when $d=650$ mm. (a) $\alpha=50^\circ$; (b) $\alpha=60^\circ$; (c) $\alpha=70^\circ$

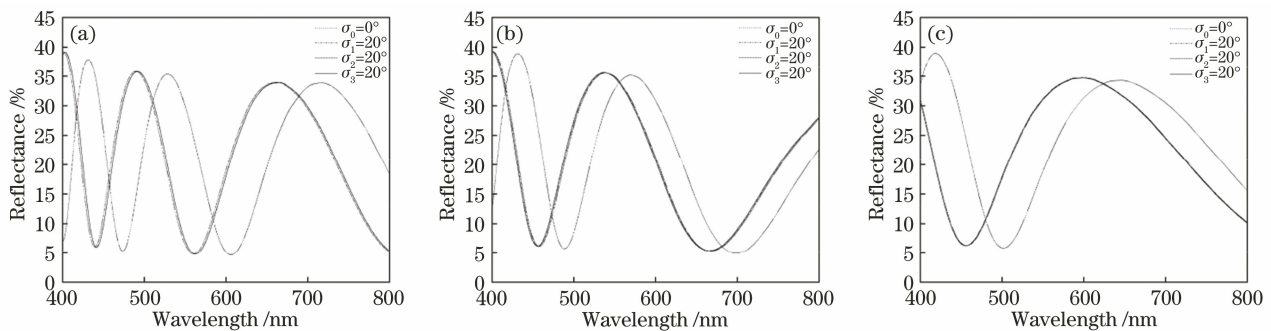


图 9 $d=700$ mm 时不同倾角条件下的反射曲线。(a) $\alpha=50^\circ$; (b) $\alpha=60^\circ$; (c) $\alpha=70^\circ$

Fig. 9 Reflection curves under different dips when $d=700$ mm. (a) $\alpha=50^\circ$; (b) $\alpha=60^\circ$; (c) $\alpha=70^\circ$

3.2 测试与分析

根据图 7~10 中每条实测的反射曲线, 利用 Macleod 软件模拟出实际物理厚度, 并整理成表 2。其中, $T_{\sigma_0}, T_{\sigma_1}, T_{\sigma_2}, T_{\sigma_3}$ 分别表示反射曲线 $\sigma_0, \sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ 的物理厚度。相对膜厚值用 T_{20°/T_{0° 表示, 其中 T_{20° 为 $T_{\sigma_1}, T_{\sigma_2}, T_{\sigma_3}$ 的平均值。膜厚均匀性的计

$$\text{算公式可表示为 } \Delta T = \pm \frac{T_{0^\circ} - T_{20^\circ}}{T_{0^\circ} + T_{20^\circ}} \times 100\% [14]。$$

从表 2 的数据可以看出, 当公转半径 d 与倾角 α 确定时, 弯月透镜张角大小为 20° 处的膜厚值基本相同。图 11 与表 2 中张角为 0° 和张角为 20° 处的膜厚数据相对应。其中, 横坐标表示公转半径 d 的大

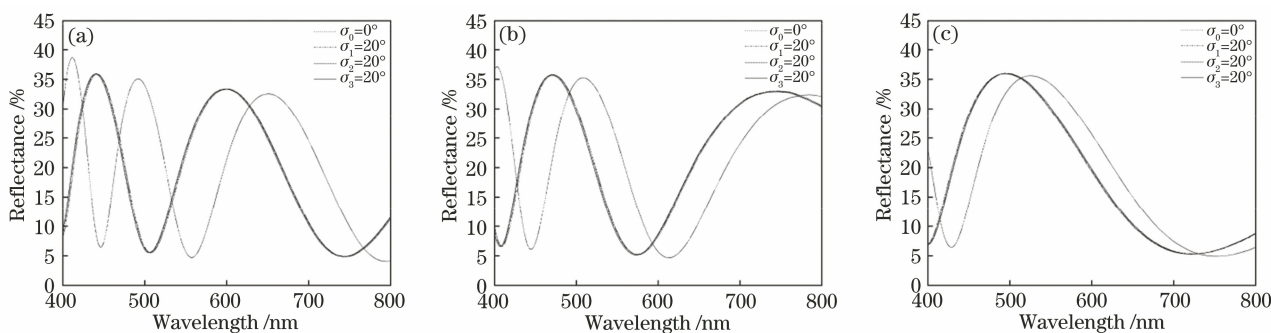


图 10 $d=740$ mm 时不同倾角条件下的反射曲线。(a) $\alpha=50^\circ$; (b) $\alpha=60^\circ$; (c) $\alpha=70^\circ$

Fig. 10 Reflection curves under different dips when $d=740$ mm. (a) $\alpha=50^\circ$; (b) $\alpha=60^\circ$; (c) $\alpha=70^\circ$

表 2 不同 d 与 α 下的膜厚数据

Table 2 Film thickness data under different d and α

| d / mm | α / ($^\circ$) | T_{σ_1} / nm | T_{σ_2} / nm | T_{σ_3} / nm | T_{20° / nm | T_{0° / nm | $T_{20^\circ} / T_{0^\circ}$ |
|----------|-------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|--------------------|------------------------------|
| 570 | 50 | 548.6 | 548.2 | 549.1 | 548.6 | 598.1 | 0.9172 |
| | 60 | 452.3 | 453.1 | 451.8 | 452.4 | 483.7 | 0.9352 |
| | 70 | 359.3 | 358.4 | 357.8 | 358.5 | 390.7 | 0.9175 |
| 650 | 50 | 441.1 | 442.0 | 442.8 | 442.0 | 476.9 | 0.9268 |
| | 60 | 340.9 | 340.3 | 341.4 | 340.9 | 357.0 | 0.9522 |
| | 70 | 240.4 | 239.7 | 239.1 | 239.7 | 258.8 | 0.9266 |
| 700 | 50 | 371.6 | 372.3 | 373.0 | 372.3 | 403.9 | 0.9217 |
| | 60 | 297.5 | 296.9 | 296.0 | 296.8 | 315.0 | 0.9422 |
| | 70 | 200.9 | 200.1 | 199.5 | 200.2 | 217.2 | 0.9217 |
| 740 | 50 | 339.3 | 340.2 | 338.8 | 339.4 | 370.2 | 0.9168 |
| | 60 | 259.6 | 258.7 | 258.3 | 258.9 | 276.7 | 0.9357 |
| | 70 | 160.3 | 159.4 | 161.0 | 167.2 | 174.8 | 0.9165 |

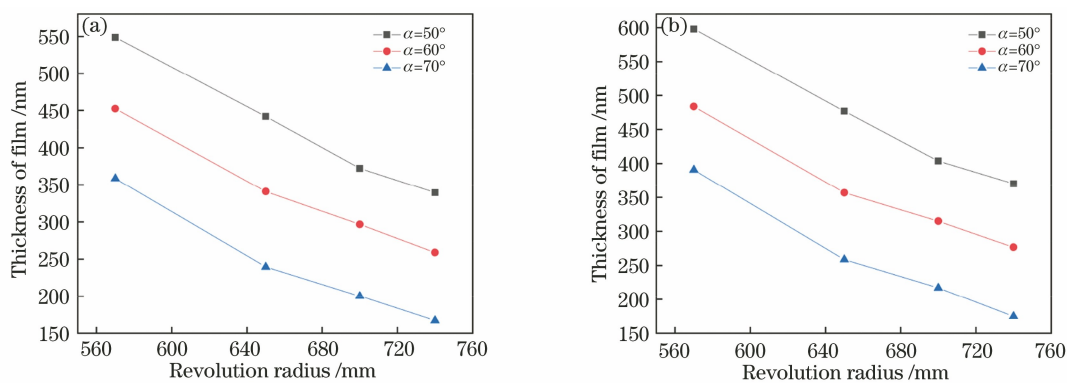


图 11 不同 β 下弯月透镜中心与边缘的膜厚分布。(a) $\beta=20^\circ$; (b) $\beta=0^\circ$

Fig. 11 Film thickness distribution at center and edge of meniscus lens under different β . (a) $\beta=20^\circ$; (b) $\beta=0^\circ$

小, 纵坐标表示弯月透镜凸面表面的膜厚值。

从图 11 中可发现: 当倾角 α 不变时, 弯月透镜中心与边缘的膜厚值都随着公转半径 d 的增大而减小; 当公转半径 d 不变时, 弯月透镜中心与边缘的膜厚值都随着三级盘倾角 α 的增大而减小; 当公

转半径 d 与倾角 α 相同时, 弯月透镜表面张角为 0° 处的膜厚值 T_{0° 总要比张角为 20° 处的膜厚值 T_{20° 大。

再根据表 2 中的相对膜厚值制成图 12。横坐标表示公转半径 d 的大小, 纵坐标表示相对膜厚值

的大小。

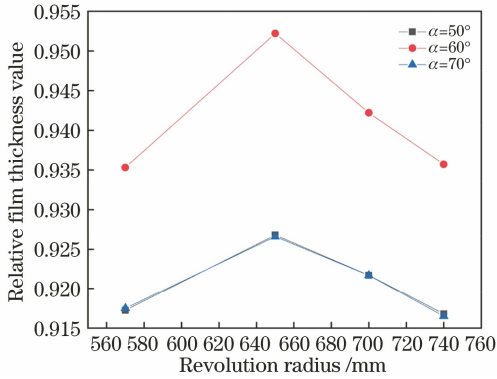


图 12 不同公转半径与倾角下的相对膜厚分布

Fig. 12 Distribution of relative film thickness under different revolution radii and dips

从图 12 中可以发现:当公转半径 d 确定时,相对膜厚值 T_{20°/T_0 随着三级盘倾角 α 的增大,先增大后减小,在倾角为 $\alpha = 60^\circ$ 时达到最大值;当三级盘倾角 α 确定时,相对膜厚值 T_{20°/T_0 随着公转半径 d 的增大,先增大后减小,在公转半径为 $d = 650$ mm

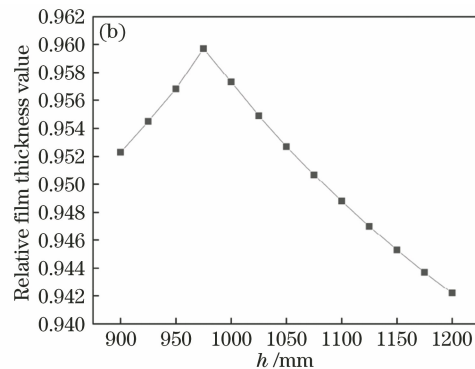
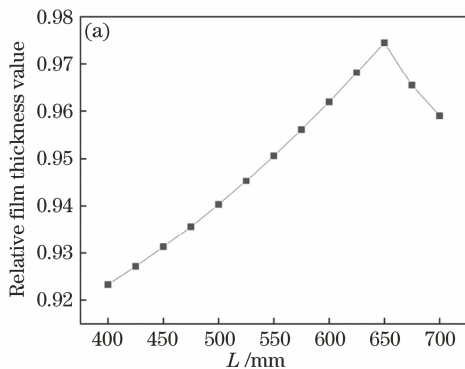


图 13 相对膜厚分布随 L 与 h 的变化。(a) $h = 1050$ mm 时相对膜厚分布随 L 的变化;(b) $L = 560$ mm 时相对膜厚分布随 h 的变化

Fig. 13 Relative film thickness distribution varying with L and h . (a) Relative film thickness distribution varying with L when $h = 1050$ mm; (b) relative film thickness distribution varying with h when $L = 560$ mm

从图 13(a)中可以看出:当 $h = 1050$ mm 时,相对膜厚值随着蒸发源位置 L 的增大,先增大后减小;当 $L = 650$ mm 时,即 $h/L \approx 1.62$ 时,相对膜厚达到最大值(0.9744)。从图 13(b)中可以看出:相对膜厚值随着二级盘高度 h 的增大,先增大后减小;当 $h = 975$ mm 时,即 $h/L \approx 1.74$ 时,相对膜厚达到最大值(0.9597)。

因此,在之后进行镀膜设备结构设计时,可以适当地调整三级公自转行星系统二级盘的高度和蒸发源的位置,以获得更好的膜厚均匀性。

4 结 论

利用三级公自转行星系统对弯月透镜表面膜厚

时达到最大值。与图 6 仿真图中相对膜厚分布变化趋势基本相同。实验得到的相对膜厚值与理论计算结果偏差优于 0.0018,验证了所提理论模型的正确性。其中,当公转半径为 $d = 650$ mm、倾角为 $\alpha = 60^\circ$ 时,相对膜厚达到最大值 0.9522,此时对应的膜厚均匀性为 $\pm 2.45\%$ 。此外,当公转半径 d 与倾角 α 相同时,三级公自转行星系统中弯月透镜表面膜厚均匀性远远优于二级行星系统中弯月透镜表面的膜厚均匀性。

当对图 5 中弯月透镜凹面均匀性进行研究时,通过实验发现,当公转半径为 $d = 740$ mm、倾角为 $\alpha = 65^\circ$ 时,凹面表面膜厚均匀性可达 $\pm 0.62\%$,远远高于凸面。因此,本文只讨论了弯月透镜凸面表面膜厚均匀性的情况。

3.3 三级盘高度与蒸发源位置对膜厚分布的影响

现将三级公自转行星系统的配置定为公转半径为 $d = 650$ mm、倾角为 $\alpha = 60^\circ$,研究二级盘高度 h 和蒸发源位置 L 对弯月透镜表面膜厚均匀性的影响,如图 13 所示。

均匀性问题进行了研究与分析。根据弯月透镜在三级公自转行星系统中的运动轨迹和本身的遮挡情况,建立了与三级盘倾角、公转半径有关的弯月透镜表面相对膜厚分布模型。然后,利用该模型进行仿真分析,获得了具有较好膜厚均匀性的空间位置。同时,在光驰 OTFC1800X 型三级公自转行星真空镀膜机上进行了实验,当将公转半径 d 与倾角 α 调节为 650 mm 与 60° 时,在弯月透镜凸面表面镀制 Ti_3O_5 单层膜,结果表明,在未使用修正挡板技术的情况下弯月透镜凸面的表面膜厚均匀性优于 $\pm 2.45\%$ 。

在本实验中,加入修正挡板或在二三级盘整体中加入行进角还会进一步影响弯月透镜表面的膜厚分布,这将会是下一步的研究方向。

参 考 文 献

- [1] Oliver J B, Talbot D. Optimization of deposition uniformity for large-aperture national ignition facility substrates in a planetary rotation system[J]. *Applied Optics*, 2006, 45(13): 3097-3105.
- [2] 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.
- [3] 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.
Tang J F, Gu P F, Liu X. Modern optical thin film technology [M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2006.
- [4] 李正中. 薄膜光学与镀膜技术[M]. 9版. 新北市: 艺轩图书出版社, 2019.
Li Z Z. Thin film optics and coating technology[M]. 9th ed. New Taipei City: Yi Hsien Publishing Co., Ltd., 2019.
- [5] 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.
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.
- [6] 郭春, 孔明东, 柳存定, 等. 平面行星系统修正挡板校正膜厚均匀性[J]. *光学学报*, 2013, 33(2): 231002.
Guo C, Kong M D, Liu C D, et al. Shadowing masks for thickness uniformity in a plane planetary system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(2): 231002.
- [7] 徐嶺茂, 王济洲, 李坤, 等. 蒸发镀膜基片工装改进与镀膜均匀性研究[J]. *真空与低温*, 2021, 27(5): 444-448.
Xu L M, Wang J Z, Li K, et al. Improvement of substrate holder for evaporation and film uniformity verification[J]. *Vacuum and Cryogenics*, 2021, 27(5): 444-448.
- [8] 吴伟, 王济洲, 熊玉卿, 等. 半球形基底镀膜膜厚均匀性理论分析[J]. *真空科学与技术学报*, 2014, 34(4): 320-324.
Wu W, Wang J Z, Xiong Y Q, et al. Theory analysis of vacuum evaporation of thin film with uniform thickness hemispherical substrate [J]. *Chinese Journal of Vacuum Science and Technology*, 2014, 34(4): 320-324.
- [9] 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]. 成都: 中国科学院光电技术研究所, 2019: 31-47.
Liu C D. Spectrum uniformity optimization of 193 nm AR coatings on spherical substrates [D]. Chengdu: Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, 2019: 31-47.
- [10] 樊彦峥, 潘永强, 刘金泽, 等. 热蒸发制备大口径铝膜的膜厚均匀性分析[J]. *光学与光电技术*, 2021, 19(2): 108-114.
Fan Y Z, Pan Y Q, Liu J Z, et al. Analysis of film thickness uniformity of large-diameter aluminum film deposited by thermal evaporation [J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2021, 19(2): 108-114.
- [11] 潘永刚, 刘政, 王奔, 等. 电子束蒸发球面夹具系统膜厚均匀性的研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(5): 0531001.
Pan Y G, Liu Z, Wang B, et al. Research on film thickness uniformity of electron beam evaporation spherical fixture system [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(5): 0531001.
- [12] 朱元强. 半球透镜膜厚分布分析[J]. *光学与光电技术*, 2020, 18(1): 59-62.
Zhu Y Q. Study on film thickness distribution of hemispherical lens [J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2020, 18(1): 59-62.
- [13] 王奔. 物理气相沉积系统中膜厚分布的模拟及优化[D]. 长春: 长春理工大学, 2019: 22-25.
Wang B. Simulation and optimization of film thickness uniformity in physical vapor deposition [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2019: 22-25.
- [14] 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.
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.
- [15] 毕军, 易葵, 黄建兵, 等. 电子束蒸发镀膜膜厚均匀性的修正方法: CN1718844A[P]. 2008-01-23.
Bi J, Yi K, Huang J B, et al. Correction method of evenness of film thickness of electron beam evaporation film coating: CN1718844A [P]. 2008-01-23.