

大陡度透镜表面膜层折射率均匀性分析

张伟丽^{1,3}, 冯操^{1,2,3}, 孙建^{1,3}, 朱瑞^{1,3}, 王建国^{1,3}, 沈雪峰^{1,3}, 易葵^{1,3}, 朱美萍^{1,3}, 邵建达^{1,3}¹中国科学院上海光学精密机械研究所薄膜光学实验室, 上海 201800;²中国科学院大学材料与光电研究中心, 北京 100049;³中国科学院上海光学精密机械研究所强激光材料重点实验室, 上海 201800

摘要 集成电路与光刻机系统中通常会设计并使用很多小曲率半径的大陡度透镜, 以实现大数值孔径, 这对镀制于其表面的紫外薄膜的性能提出了很高的要求。本文分析了行星夹具转动过程中大陡度凸透镜从中心到边缘位置的薄膜沉积角度的变化规律, 研究了 MgF_2 膜层的折射率随沉积角度的变化规律, 明确了大陡度凸透镜从中心到边缘位置的膜层折射率不均匀性对深紫外增透膜的影响。针对小曲率半径大陡度凸透镜表面的膜层沉积特性, 通过升高基底温度提高了折射率分布的均匀性, 为大陡度透镜膜层折射率不均匀性修正提供了理论和实验依据。

关键词 薄膜; 深紫外光学薄膜; 大陡度透镜; 折射率均匀性; 沉积角度

中图分类号 O484.4

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202148.0903001

1 引言

根据瑞利公式, 增大数值孔径(NA)是提高光刻机分辨率的重要技术手段之一。使用小曲率半径的大陡度透镜是实现大数值孔径的有效技术手段, 但这类透镜对镀制于其上的膜层提出了巨大挑战^[1-7]。大陡度透镜镀膜的研制难点主要包括两个方面。一是入射角度范围宽。光刻机照明系统同时采用多种照明模式, 按照深紫外光刻机的设计要求, 入射角范围需要达到 $0^\circ \sim 60^\circ$, 这意味着透镜上的膜层需在 $0^\circ \sim 60^\circ$ 范围内都满足高透过率的要求^[1,3]。二是大陡度透镜膜层的均匀性控制。首先, 由于大陡度透镜表面中间和边缘位置到透镜中心和蒸发源的距离均不相同, 在透镜元件径向方向上不可避免地会出现膜层厚度不均匀分布的情况^[8-12]; 其次, 由于大陡度透镜表面中间和边缘位置镀膜材料沉积的入射角度不同, 因此薄膜呈不同的生长状态, 膜层的填充密度和表面粗糙度也会出现相应的变化^[13-17], 从而导致膜层折射率会出现不均匀现象。对于深紫外波段常用氟化物薄膜的倾斜沉积, 人们已经开展了一定的研究工作, 但没有单独给出沉积角度、沉积

温度、行星夹具转动等工艺参数对膜层折射率不均匀性的影响规律, 仅给出了多工艺参数共同作用对膜层折射率的影响; 并且, 在制备增透膜时, 将膜层折射率不均匀性进行了平均, 即把透镜不同位置处的折射率视作相同, 通过厚度的均匀性修正来实现增透膜的性能, 这样的等效在分析膜层的各种特性及变化规律时会产生较大误差。因此, 很有必要充分研究大陡度透镜不同位置处的折射率不均匀性对膜层性能的影响, 并提出相应的控制技术。

本文针对大陡度凸透镜的膜层沉积特性, 分析了行星夹具转动过程中大陡度凸透镜不同位置处的沉积角度的变化规律, 分别研究了沉积角度变化和基底温度变化对膜层折射率的影响, 明确了大陡度凸透镜不同位置处膜层折射率不均匀性的变化规律对深紫外增透膜的影响, 为大陡度透镜膜层折射率不均匀性修正提供了理论依据和实验基础。

2 大陡度凸透镜沉积角度的变化

2.1 镀膜机内行星转动系统

通光口径(C_A)与透镜球面曲率半径(R_{oc})之比是衡量整个透镜弯曲程度的重要参数, 该参数的绝

收稿日期: 2020-11-30; 修回日期: 2020-12-23; 录用日期: 2021-01-08

基金项目: 国家自然科学基金(U1831211)

*E-mail: wlzhang@siom.ac.cn

对值越大,透镜陡度越大,对镀制在其表面的膜层性能的影响就越大。

图 1(a)为球面光学元件夹具行星转动系统示意图,图 1(b)为其简化的俯视图。 XY 平面为真空镀膜室底座所在的平面,坐标原点为底座平面的中心, Z 轴正方向为竖直向上方向。将蒸发源 S 视为小平面对蒸发源,其平行于 XY 平面,其位置用点坐标 $S(x_s, y_s, z_s)$ 表示。行星盘平行于 XY 平面,高度为 H ,行星盘公转轨迹的半径为 R 。基底是一个通光口径为 C_A 、曲率半径为 R_{oc} 的球面凸透镜元件。透镜通光口径所在平面与行星盘平面重合,即凸透镜最高点的高度为 H ,球心坐标为 $O(x_o, y_o, z_o)$ 。当基底为凹透镜时,采用相似的安装方式,不同的是此时凹透镜最低点的高度为 H 。 $P(x, y, z)$ 是透镜元件上的一个小面元。 s 是蒸发

源表面法线矢量, r 是蒸发源 S 指向面元 P 的矢量, φ 是矢量 s 与矢量 r 的夹角,即蒸发角。 c 是面元 P 指向球心 O 的矢量,长度为 R_{oc} 。 θ 是矢量 c 与矢量 r 的夹角,即沉积角。 L 是矢量 c 在 XY 平面上投影的距离,即矢量 c 的水平距离,此参数决定了面元 P 在基底上的径向位置。如图 1(b)所示,将 Y 方向定位为公转和自转的初始方向。 β 为面元 P 在基底上的初始角度,它决定了面元 P 在基底上的轴向位置。 α 为行星盘公转角度, K 为行星盘自转和公转的转速比。对于本文使用的 Leybold SyrusPro 1110 真空镀膜设备, $H = 730 \text{ mm}$, $R = 300 \text{ mm}$, $K = 131/19$ 。在制备增透膜时使用的两个蒸发源的位置分别是 $(-230, 165, 0)$ 与 $(-230, -165, 0)$,即蒸发源均在 XY 平面上,且关于 X 轴对称。

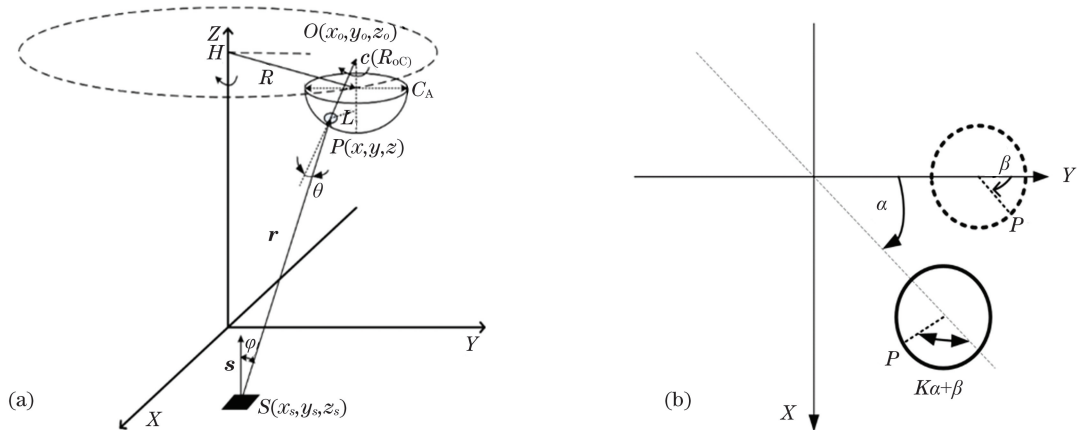


图 1 透镜行星转动系统示意图及其俯视图。(a)示意图;(b)俯视图

Fig. 1 Schematics of lens planetary rotation system. (a) Schematic; (b) top view

2.2 大陡度透镜旋转过程中不同位置处膜层沉积角度的变化

本文选取近半球状的大陡度凸透镜,其参数为:通光口径 $C_A = 116.5 \text{ mm}$,曲率半径 $R_{oc} = 64.7 \text{ mm}$,两者之比为 1.8。使用 MATLAB 编写了计算程序,模拟该透镜从中心到边缘不同位置在

行星盘旋转过程中膜层沉积角度的变化。因为沉积角是蒸发源 S 指向面元 P 的矢量 r 与面元 P 指向球心 O 的矢量 c 的夹角,通过(1)式进行矢量计算即可得到沉积角 θ 。对于沉积角 $\geq 90^\circ$ 的位置,由于透镜自身遮挡效应膜层无法实现沉积,皆认为沉积角为 90° 。

$$\theta = \arccos\left(\frac{\mathbf{r} \cdot \mathbf{c}}{|\mathbf{r}| \cdot |\mathbf{c}|}\right) = \arccos\left[\frac{(x - x_s)(x_o - x) + (y - y_s)(y_o - y) + (z - z_s)(z_o - z)}{r \cdot R_{oc}}\right]. \quad (1)$$

图 2 给出了行星夹具旋转 360° 过程中,从透镜中心到边缘的 7 个位置点处的沉积角度变化,各位置点到中心的距离 r 分别为 0, 10, 20, 30, 40, 50, 58.25 mm。从图 2 中可以看出,当 $r = 50 \text{ mm}$ 时,出现了沉积角大于 90° 的情况,此时由于透镜的遮挡效应,膜层已经不能沉积到相应位置处,即对于该

透镜,在旋转过程中存在膜层厚度为 0 的情况。

如表 1 和图 3 所示,本文对每个位置点的沉积角度变化进行了统计分析。可以看出,膜层平均沉积角度从透镜中心到边缘逐渐增大,而且平均沉积角度范围逐渐变大,对膜层厚度以及结构特性的影响也越来越大。

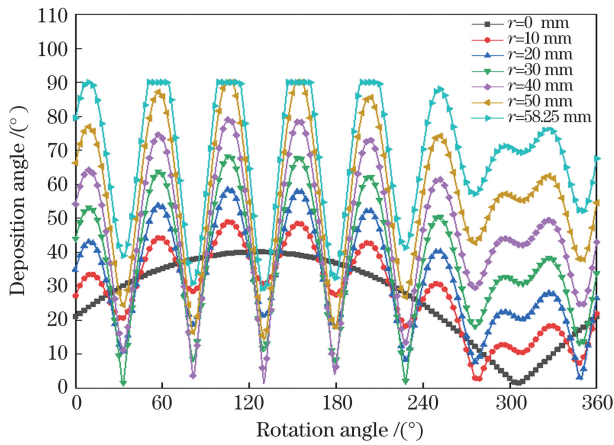


图 2 大陡度透镜转动过程中沉积角度的变化

Fig. 2 Change of deposition angle during the rotation of the steep lens

表 1 大陡度透镜不同位置处沉积角度的变化范围

Table 1 Variation range of deposition angle at different positions of steep lens

r / mm	0	10	20	30	40	50	58.25
Range of deposition angle / ($^{\circ}$)	1.41—40.06	2.08—48.98	2.40—58.48	1.53—68.4	1.25—79.17	14.05—90	28.54—90
Average deposition angle / ($^{\circ}$)	27.08	28.43	31.95	37.53	45.6	56.8	68.27

3 实验结果及讨论

3.1 样品制备及测试

本文选取深紫外光学薄膜常用的镀膜材料 MgF_2 作为研究对象,研究膜层在不同沉积角度下(相当于大陡度透镜表面的不同位置)折射率的变化规律。采用电子束蒸发技术制备样品,镀膜设备为 Leybold SyrusPro 1110 型镀膜机,制备样品时的本底真空度优于 3×10^{-4} Pa,膜层沉积速率为 0.3 nm/s ,膜层沉积角度分别选取 0° 、 30° 、 60° 和 85° ,角度的调节通过调整镀膜夹具实现。分别在紫外熔石英基底和硅基底上制备 MgF_2 薄膜,基底烘烤温度分别为 25°C 和 200°C 。紫外熔石英基底上的膜层用于测试薄膜的透反射率,硅基底上的膜层用于观察薄膜的截面形貌。

样品的折射率分别采用光谱反射率/透射率包络曲线拟合法和椭圆偏振仪测试法相互验证。采用 Lambda 1050 型紫外可见分光光度计及其反射附件测试样品的透反射率,测试范围为 $200 \sim 850 \text{ nm}$,测量步长为 1 nm ,测量精度为 $\pm 0.08\%$ 。在获得透反射率光谱曲线后,采用 Macleod 光学设计软件基于包络法折射率计算程序进行折射率的计算。样品椭圆数据的测试在 HORIBA UVISEL 2 仪器上进行,

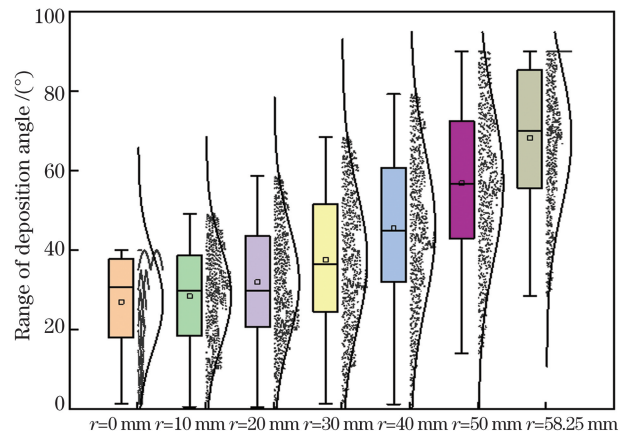


图 3 大陡度透镜不同位置处沉积角度的变化范围

Fig. 3 Variation range of deposition angle of the steep lens

光学常数拟合时首先在吸收很低的可见光波段进行,得出膜层的初始厚度,然后在此基础上扩展波长范围,得到 $200 \sim 800 \text{ nm}$ 波段的折射率色散曲线。样品的膜厚信息如表 2 所示。

表 2 不同薄膜样品的膜层厚度

Table 2 Film thickness of different samples

Deposition angle / ($^{\circ}$)	Film thickness / nm	
	Deposition temperature of 25°C	Deposition temperature of 200°C
0	433	385
30	380	312
60	356	258
85	310	289

膜层的结晶性能采用 X 射线衍射(XRD)技术进行探测,XRD 衍射仪使用的 X 射线源为 $\text{Cu-K}\alpha$ ($\lambda = 0.15418 \text{ nm}$),其测量角度 2θ 范围为 $10^{\circ} \sim 90^{\circ}$ (步进数为 0.01°)。薄膜的晶粒尺寸采用 Scherrer 公式 $D = k\lambda / (\beta \cos \theta)$ 进行计算,其中: k 为晶体的 Scherrer 常数, $k = 0.9$; θ 和 β 分别为拟合的结晶衍射峰对应的衍射角和半峰全宽,可利用 Jade 软件拟合确定。 MgF_2 膜层柱状生长形貌采用 SU8220 型场发射扫描电镜(SEM)在放大 10 万倍的条件

获得。

3.2 沉积角度对 MgF₂ 膜层折射率的影响

在基底温度为 25 °C 的条件下,4 种沉积角度膜层的透射和反射曲线分别如图 4 和图 5 所示。通过光谱包络拟合法和椭圆偏振测试法得到了不同沉积角度下 MgF₂ 膜层的折射率色散曲线,如图 6 所示。图 7 给出 200 nm 波长处折射率随入射角度的变化图。

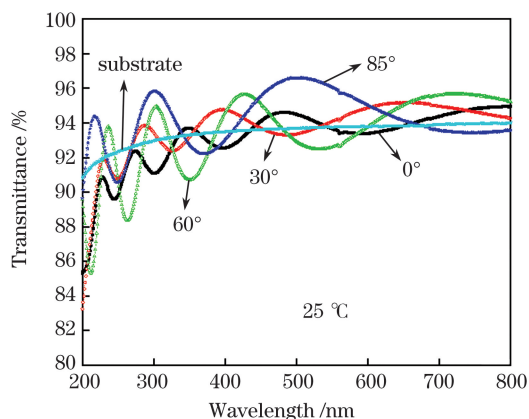


图 4 不同沉积角度下 MgF₂ 膜层的透射曲线(基底温度为 25 °C)

Fig. 4 Transmittance curve of MgF₂ films under different deposition angles (deposition temperature of 25 °C)

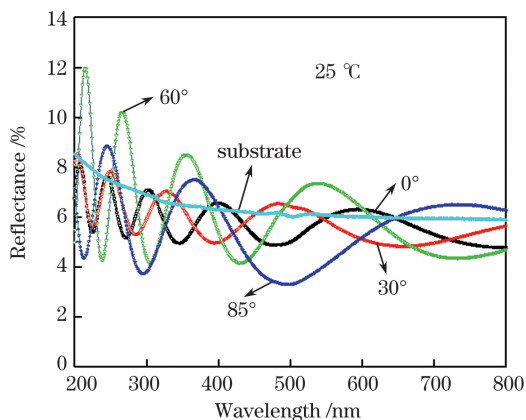


图 5 不同沉积角度下 MgF₂ 膜层的反射曲线(基底温度为 25 °C)

Fig. 5 Reflectance curve of MgF₂ films under different deposition angles (deposition temperature of 25 °C)

从图 6 和图 7 中可以看出沉积角度对 MgF₂ 膜层的折射率有显著影响:随着沉积角度增大,膜层折射率逐渐降低;沉积角度在 0°~30° 范围时,折射率的变化很小,而当沉积角度超过 30° 后,折射率下降明显。

理论上,随着沉积角度增大,先镀制到基底上的薄膜颗粒会产生自遮挡效应,如图 8 中的阴影区域

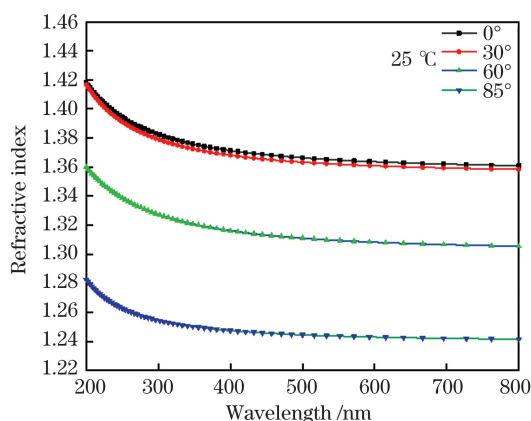


图 6 不同沉积角度下 MgF₂ 膜层的折射率色散曲线(基底温度为 25 °C)

Fig. 6 Refractive index dispersion curve of MgF₂ films under different deposition angles (deposition temperature of 25 °C)

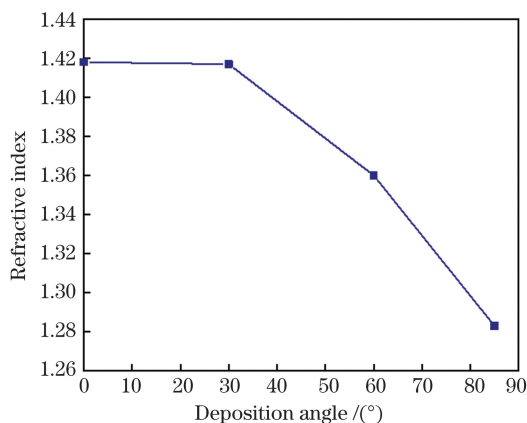


图 7 基底温度为 25 °C 时 MgF₂ 膜层折射率(200 nm 处)随沉积角度的变化

Fig. 7 Variation of refractive index(at 200 nm) of MgF₂ films with deposition angle (deposition temperature of 25 °C)

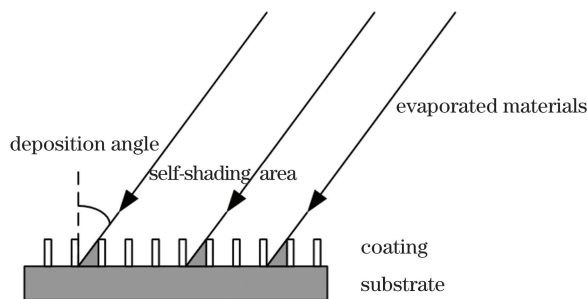


图 8 膜层自遮挡效应示意图

Fig. 8 Schematic of self-shading effect

所示,使后面蒸发的膜料不能沉积在这些阴影区域。自遮挡效应使得在大沉积角度下镀制的膜层是疏松多孔的。沉积角度不同,光学薄膜材料自遮挡效应的影响也不同:当沉积角度比较大时,自遮挡效应比

较明显,制备出来的光学薄膜比较疏松;当沉积角度比较小时,自遮挡效应不太明显,制备出来的光学薄膜比较致密。图 9 给出了不同沉积角度下 MgF_2 膜层的截面形貌图,可以清晰地看到膜层的倾斜生长特性。

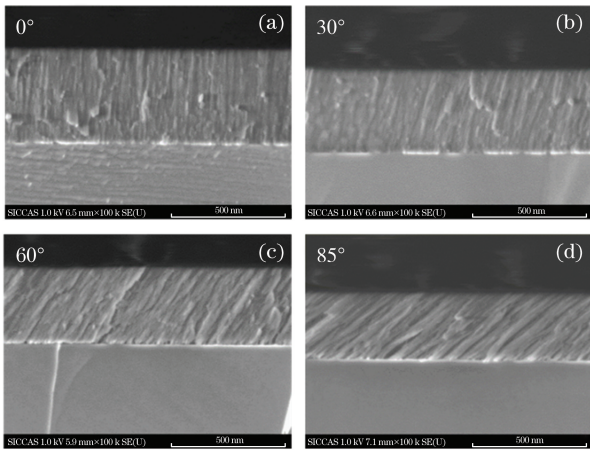


图 9 不同沉积角度下 MgF_2 膜层的截面形貌图(基底温度为 25 °C)。(a) 0°;(b) 30°;(c) 60°;(d) 85°

Fig. 9 Cross-sectional topography of MgF_2 films under different deposition angles (deposition temperature of 25 °C). (a) 0°; (b) 30°; (c) 60°; (d) 85°

3.3 沉积温度对折射率均匀性的提升效果

从图 6 和图 7 可以计算出,在 25 °C 的基底温度下,当沉积角度从 0°增大到 85°时, MgF_2 膜层在 200 nm 处的折射率从 1.42 降低到 1.28,折射率的变化量为 0.14,折射率的不均匀性为 10.22%。为了提升膜层的折射率的均匀性,实验中提高膜层的沉积温度到 200 °C。本文分析得到了 200 °C 基底温度下 MgF_2 膜层的透反射率,如图 10 和图 11 所示,

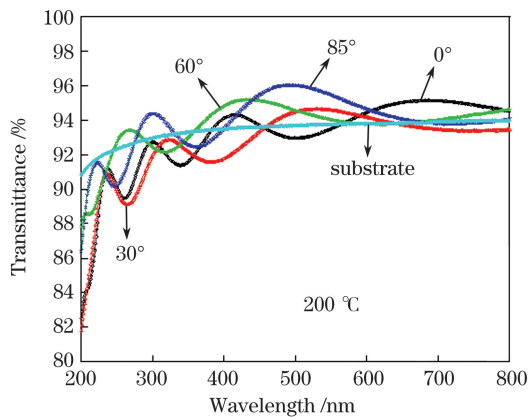


图 10 不同沉积角度下 MgF_2 膜层的透射曲线(基底温度为 200 °C)

Fig. 10 Transmittance curve of MgF_2 films under different deposition angles (deposition temperature of 200 °C)

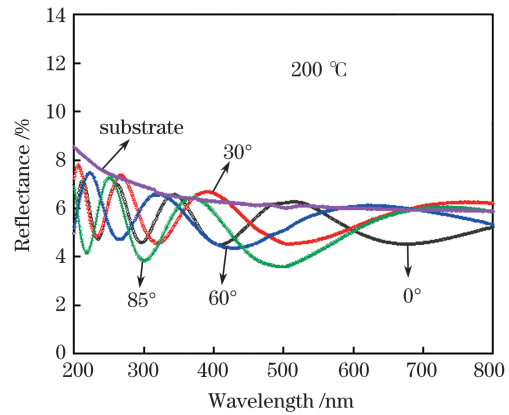


图 11 不同沉积角度下 MgF_2 膜层的反射曲线(基底温度为 200 °C)

Fig. 11 Reflectance curve of MgF_2 films under different deposition angles (deposition temperature of 200 °C)

并拟合得到了折射率及其均匀性分布,如图 12 和图 13 所示。

由图 13 给出的不同基底温度下膜层折射率的变化可以发现,温度升高后,折射率及其分布与升高前有两点不同:一是相同沉积角度下 MgF_2 膜层的折射率增大,二是折射率均匀性提高。在 200 °C 的基底温度下,随着沉积角度从 0°增大到 85°, MgF_2 膜层在 200 nm 处的折射率从 1.45 降低到 1.39,折射率的变化量为 0.06,折射率的不均匀性为 4.51%。可见,随着基底温度从 25 °C 升高到 200 °C,不同沉积角度下膜层的折射率均匀性提升了一倍。

基底沉积温度对膜层生长特性的影响体现在两个方面:一是提高了膜料在基底表面的迁移率,二是

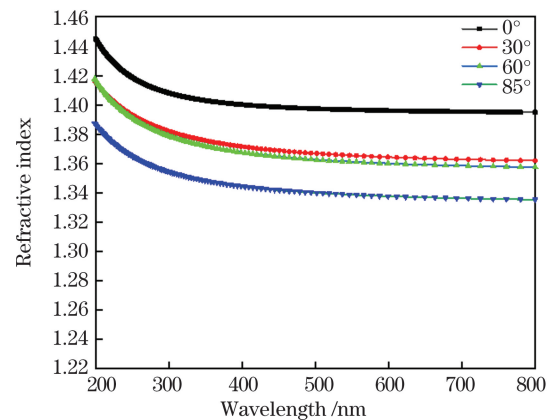


图 12 不同沉积角度下 MgF_2 膜层的折射率色散曲线(基底温度为 200 °C)

Fig. 12 Refractive index dispersion curve of MgF_2 films under different deposition angles (deposition temperature of 200 °C)

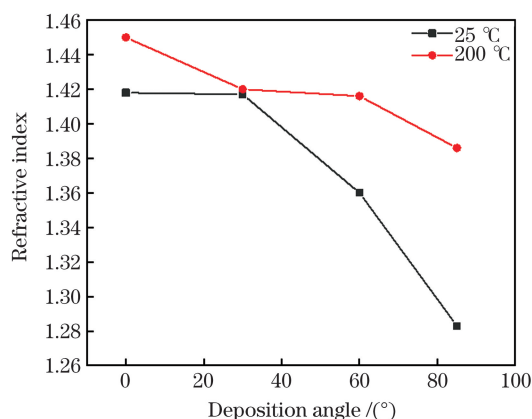


图 13 200 nm 处 MgF₂ 膜层折射率随沉积角度的变化
Fig. 13 Refractive index at 200 nm of MgF₂ films with deposition angle

增大了膜层柱状结构之间的结合力。两者都会增大膜层的堆积密度,膜层堆积密度增大,意味着折射率增大。但是,在倾斜沉积下,膜层的倾斜柱状结构会对膜层的迁移率和柱状结构间的结合力产生不利影响,不利影响的效果会因柱状结构倾斜角度的不同而有所差异。因此,图 13 中两组样品的折射率变化呈现出不同的变化规律。

图 14 为两种基底温度下不同沉积角度样品的 XRD 图谱,可以明显地看出基底温度和沉积角度对 MgF₂ 膜层结晶状态的影响。在 25 °C 的基底温度下, MgF₂ 膜层在(110)、(111)、(211)三个晶向上呈现结晶生长,但是随着沉积角度增大,受自遮挡效应的影响,结晶生长受到抑制,膜层呈现非晶态生长。基底温度升高到 200 °C 后, MgF₂ 膜层的 XRD 谱中除了出现了(110)、(111)、(211)三个晶向外,还出现了(101)、(210)、(220)、(002)、(301)等结晶方向,而且随着沉积角度增大,结晶强度减小。

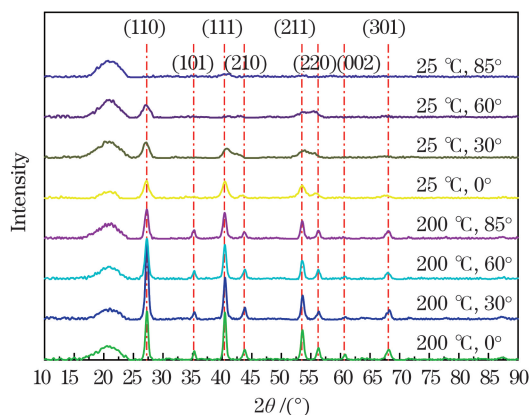


图 14 两组样品的 XRD 图谱
Fig. 14 XRD spectra of two samples

3.4 MgF₂ 单层膜折射率均匀性对增透膜光学特性的影响

MgF₂ 是深紫外波段最常用的低折射率镀膜材料,本文已经从理论和实验方面分析了大陡度透镜面上该膜层的折射率变化,下面分析这种变化对大陡度透镜表面增透膜性能的影响。选择 193 nm 增透膜进行分析,使用的基底是 ArF 级熔石英。193 nm 增透膜的膜系为 LHL,其中 L 为四分之一光学厚度的 MgF₂ 膜层, H 为四分之一光学厚度的 LaF₃ 膜层。计算时, LaF₃ 膜层的折射率和厚度不变,同时 MgF₂ 膜层的厚度也保持不变,根据两种基底温度下 MgF₂ 膜层的折射率分布情况,改变 MgF₂ 膜层的折射率 n ,研究其对 193 nm 增透膜剩余反射率的影响,结果如图 15 和图 16 所示。可以

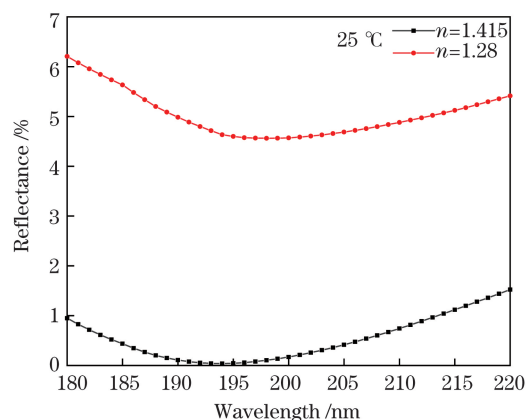


图 15 MgF₂ 膜层折射率对 193 nm 增透膜剩余反射率的影响(基底温度为 25 °C)

Fig. 15 Influence of refractive index of MgF₂ films on residual reflectance of 193 nm antireflection films (deposition temperature of 25 °C)

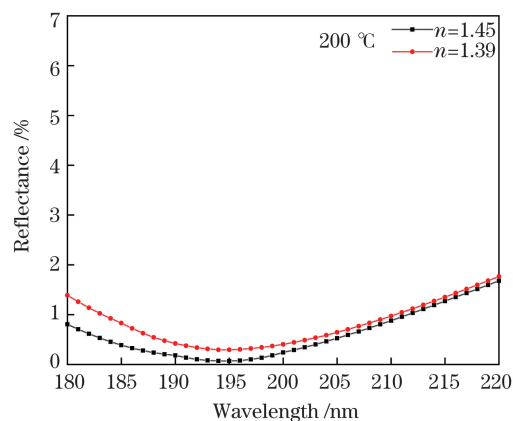


图 16 MgF₂ 膜层折射率对 193 nm 增透膜剩余反射率的影响(基底温度为 200 °C)

Fig. 16 Influence of refractive index of MgF₂ films on residual reflectance of 193 nm antireflection films (deposition temperature of 200 °C)

看出:对于在 25 °C 基底温度下沉积的 MgF_2 膜层,其折射率的不均匀性对 193 nm 增透膜剩余反射率的影响非常大,剩余反射率从 0.04% 增大到 4.72%;对于在 200 °C 基底温度下沉积的 MgF_2 膜层,其折射率的不均匀性对 193 nm 增透膜剩余反射率的影响明显较小,剩余反射率从 0.08% 增大到 0.32%。虽然这一变化明显小于低温沉积的膜层,但是这种光性不均匀性对光刻机系统整体的均匀性影响也是不容许的,因此还需要深入研究这种折射率不均匀性对深紫外薄膜光学特性均匀性的影响。

4 结 论

本文从理论和实验两方面深入研究了大陡度透镜表面膜层沉积角度变化对膜层折射率均匀性的影响。对于接近半球状的凸透镜来说,随着膜层沉积角度从 1.41° 增大到 90°,出现了部分位置不能沉积薄膜的情况。对于 MgF_2 膜层来说,当基底温度为 25 °C 时,不同沉积角度下镀制的膜层的折射率不均匀性为 10.22%,这会对 193 nm 增透膜的光性产生显著影响;升高基底温度到 200 °C 时,不同沉积角度下镀制的膜层的折射率不均匀性为 4.51%,对 193 nm 增透膜的光性影响明显降低,但是这种不均匀性对高精密光刻系统来说还是不能满足要求的,需要继续研究大陡度透镜膜层折射率均匀性提升技术。

参 考 文 献

- [1] Zaczek C, Müllender S, Enkisch H, et al. Coatings for next generation lithography[J]. Proceedings of the SPIE, 2008, 7101: 71010X.
- [2] Wang X Z, Dai F Z, Integrated circuit and lithographic tool[M]. 1st ed. Beijing: Science Press, 2020.
王向朝,戴凤钊. 集成电路与光刻机[M]. 1 版. 北京: 科学出版社, 2020.
- [3] Kelkar P, Tirri B, Wilklow R, et al. Deposition and characterization of challenging DUV coatings [J]. Proceedings of the SPIE, 2008, 7067: 706708.
- [4] Zeng Z S, Zhang F, Niu Z Y, et al. Angular position distribution algorithm of micro mirror array based on genetic algorithm [J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(8): 0805003.
曾宗顺,张方,牛志元,等. 基于遗传算法的微反射镜阵列角位置分布算法[J]. 中国激光, 2020, 47(8): 0805003.
- [5] Cheng W L, Zhang F, Lin D L, et al. Multi-degree-of-freedom uniformity correction method of illumination system in lithography machine[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(10): 1022004.
程伟林,张方,林栋梁,等. 光刻机照明系统的多自由度均匀性校正方法[J]. 光学学报, 2018, 38(10): 1022004.
- [6] Gan Y, Zhang F, Zhu S Y, et al. Evaluation algorithm of pupil characteristic parameters in lithography illumination system[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(3): 0304007.
甘雨,张方,朱思羽,等. 光刻机照明系统光瞳特性参数的评估算法[J]. 中国激光, 2019, 46(3): 0304007.
- [7] Zeng Y, Zhao H F, Duan W J, et al. Design of optical system with illumination uniform and high distance-height ratio based on double freeform-surface [J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(24): 2422001.
曾翌,赵会富,段文举,等. 基于双自由曲面高距高比照度均匀的光学系统设计[J]. 光学学报, 2020, 40(24): 2422001.
- [8] Sun J, Zhang W L, Yi K, et al. Optimization of thickness uniformity of coatings on spherical substrates using shadow masks in a planetary rotation system[J]. Chinese Optics Letters, 2014, 12(5): 053101.
- [9] 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.
- [10] Liu C D, Kong M D, Guo C, et al. Theoretical design of shadowing masks for uniform coatings on spherical substrates in planetary rotation systems[J]. Optics Express, 2012, 20(21): 23790-23797.
- [11] Jin Y L, Qiu Y, Zhao H, et al. Deposition of coatings with uniform thickness on large hemispherical substrate [J]. Chinese Journal of Vacuum Science and Technology, 2014, 34(4): 336-339.
金扬利,邱阳,赵华,等. 大曲率球形基底表面膜厚均匀性的实现[J]. 真空科学与技术学报, 2014, 34(4): 336-339.
- [12] Liu Q L, Yang C M, Zhang J F, et al. Numerical calculation for optical film-thickness distribution of large curvature spherical accessory [J]. Journal of Applied Optics, 2012, 33(6): 1128-1132.
刘青龙,杨崇民,张建付,等. 大曲率球面零件光学膜厚分布数值计算[J]. 应用光学, 2012, 33(6): 1128-1132.
- [13] Shi G, Mei L, Zhang L C, et al. Characterization of optical and microstructural properties of AlF_3 thin films deposited on spherical element [J]. Chinese Optics, 2013, 6(6): 906-911.
时光,梅林,张立超,等. 球面元件表面 AlF_3 薄膜

- 的光学特性和微观结构表征[J]. 中国光学, 2013, 6(6): 906-911.
- [14] Liu C D, Kong M D, Li B C, et al. Characterization of single LaF_3 and MgF_2 films on spherical substrate by planetary deposition[J]. *Thin Solid Films*, 2016, 612: 296-302.
- [15] Liu M C, Liao B H, Cho W H, et al. The research of oblique deposition of lanthanum fluoride thin film at 193 nm [C] // Conference on Nanoengineering: Fabrication, Properties, Optics, and Devices IV, August 27-30, 2007, San Diego, CA. WA, Bellingham: SPIE, 2007: 43.1-43.8.
- [16] Zhu R, Tao C X, Yu Z, et al. Design and fabrication of a 248-nm near-linearly graded transmittance optical film[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(6): 0603001.
朱瑞, 陶春先, 余振, 等. 248 nm 透过率线性渐变光学薄膜的设计与制备[J]. 中国激光, 2020, 47(6): 0603001.
- [17] Jiang S J. Functional micro/nano-structural sculptured thin films [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2009, 46(7): 23-27.
江绍基. 微纳结构功能性雕塑薄膜[J]. 激光与光电子学进展, 2009, 46(7): 23-27.

Investigation of Refractive Index Uniformity in Coatings on a Steep Lens

Zhang Weili^{1,3}, Feng Cao^{1,2,3}, Sun Jian^{1,3}, Zhu Rui^{1,3}, Wang Jianguo^{1,3},
Shen Xuefeng^{1,3}, Yi Kui^{1,3}, Zhu Meiping^{1,3}, Shao Jianda^{1,3}

¹Thin Film Optics Laboratory, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;

²Center of Materials Science and Optoelectronics Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

³Key Laboratory of High Power Laser Materials, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China

Abstract

Objective The use of large steep lenses is an effective method of increasing the numerical aperture, which has an important impact on the resolution of the lithographic system. Because to the unique geometry of the large steep lens, the distance between the steep lens surface and the evaporation source varies depending on their relative position, and uneven distribution of the film thickness will inevitably occur in the radial direction of the lens. To meet the high demands of a lithographic system with a complex optical system, a steep lens must have a high transmittance over a wide range of incident angles. As a result, controlling the homogeneity of the film on a large steep lens has become a critical issue.

As the planetary fixture rotates, the deposition angle will also change during the deposition. In this deposition, the growth state, packing density, and the roughness of film change accordingly, which leads to an uneven refractive index of the film. To investigate the deposition characteristics of the film on a steep convex lens, the mechanism of change of the deposition angle at different positions of the steep convex lens during the rotation of the planetary fixture was studied by computer simulation. The influences of the evolution of the deposition angle and the changes in the substrate temperature on the refractive index of the film were also studied. The results of experimental studies presented in this manuscript provided theoretical and practical guidance on the correction of the refractive index of the film on a steep lens.

Methods Magnesium fluoride (MgF_2), a commonly used coating material for deep ultraviolet optical thin films, was selected as the object of study. A single-layer film of magnesium fluoride was prepared by electron beam evaporation technology. The refractive index of the sample was obtained by spectral reflectance/transmittance envelope curve fitting method and the ellipsometer test method. The crystalline properties and morphology of the film were analyzed by X-ray diffraction and scanning electron microscopy, respectively. The evolution of the deposition angle during the rotation of the planetary fixture was obtained using software simulation.

Results and Discussions According to the results of computer simulation, the average deposition angle of the film gradually increases from the center of the lens to the edge, and the range of distribution of the deposition angle gradually increases too. The influence of structural characteristics becomes more obvious. When the substrate

temperature is 25 °C, the deposition angle significantly affects the refractive index of the MgF₂ film. As the deposition angle increases, the refractive index of the film gradually decreases. When the deposition angle increases from 0° to 85°, the refractive index of the MgF₂ film at 200 nm decreases from 1.42 to 1.28, the change in the refractive index is 0.14, and the non-uniformity of the refractive index is 10.22%. When the substrate temperature is 200 °C, the refractive index of the MgF₂ film at 200 nm decreases from 1.45 to 1.39 with increasing deposition angle from 0° to 85°, the change in refractive index is 0.06 and the non-uniformity of refractive index is 4.51% (Fig. 13). For the MgF₂ film deposited at a substrate temperature of 25 °C, the non-uniformity of the refractive index strongly affects the residual reflectivity of the 193 nm AR coating, increasing from 0.04% to 4.72%, whereas for the MgF₂ deposited under high substrate temperature, the non-uniformity of the refractive index of the film layer increases the residual reflectivity of the 193 nm AR coating from 0.08% to 0.32% (Fig. 13 and Fig. 14).

Conclusions The influence of the deposition angle on the uniformity of refractive index of the film was systematically studied. For the convex lens close to a hemispherical shape, the occlusion effect will be more significant with an increase in the deposition angle from 1.41° to 90°, as a result of some parts of the substrate cannot be covered with a film. For the MgF₂ film, the non-uniformity of refractive index of the film at different deposition angles is 10.22% at 25 °C, which significantly affects the optical properties of the 193 nm AR coating. When the substrate temperature increased to 200 °C, the non-uniformity of refractive index of the film at different deposition angles decreased to 4.51%, while the effect of the deposition angle on the optical properties of the 193 nm AR coating dramatically decreased. It is shown that increasing the substrate temperature in a certain range can effectively increase the uniformity of refractive index distribution. The results of the experimental studies presented in this manuscript provided theoretical and practical guidance on the correction of the refractive index of the film on steep lens.

Key words thin films; deep ultraviolet optical coating; steep lens; refractive index uniformity; deposition angle

OCIS codes 160.4670;140.7240;220.3740;230.4170