

文章编号 1004-924X (2001)02-0165-04

# 紫外-真空紫外波段的Al+MgF<sub>2</sub>膜

刘颖, 李福田

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130022)

**摘要:** Al+MgF<sub>2</sub>膜是真空紫外波段常用的一种反射膜。根据薄膜光学的电磁场理论计算了正入射条件下Al+MgF<sub>2</sub>膜在真空紫外波段的反射率随氟化镁膜厚度的变化规律。研究了Al+MgF<sub>2</sub>膜的制备工艺,利用Seya-Namioka紫外-真空紫外反射率计测得Al+MgF<sub>2</sub>膜的反射率在150nm~340nm的波段上高于80%。Al+MgF<sub>2</sub>膜制备一年后,其真空紫外波段的反射率未有明显变化。

**关键词:** 反射膜; 紫外; 真空紫外; 反射率

**中图分类号:** O484.41 **文献标识码:** A

## 1 引言

随着等离子体物理、受控核聚变等领域研究工作的发展,迫切需要制作在紫外-真空紫外波段具有较高反射能力的反射元件。铝膜在紫外-真空紫外波段具有较高的反射能力并且与玻璃基底的附着性较好,因此常被用作这一波段的反射涂层<sup>[1]</sup>。但是,铝膜在大气中极易被氧化,在铝膜表面形成的氧化膜-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>膜对真空紫外辐射的吸收能力较强,从而降低了铝膜的反射能力。为了防止或抑制铝膜的氧化,提高膜层的反射率,可以在铝膜表面蒸镀上厚度适当的一层或几层保护膜。在120nm~220nm的波段范围内,通常选用MgF<sub>2</sub>作为保护膜;在100nm~120nm之间,常选用LiF作为保护膜;对于小于100nm的极紫外波段,Pt和Rh是较好的保护膜材料<sup>[2]</sup>。

本文首先利用矩阵方法推导出Al+MgF<sub>2</sub>膜反射率的理论公式,计算了正入射时真空紫外波段几个特定波长下Al+MgF<sub>2</sub>膜反射率随氟化镁膜厚度等的变化规律。研究了制备过程中影响Al+MgF<sub>2</sub>膜反射率的主要因素。利用建立的Seya-Namioka紫外-真空紫外反射率计研究了Al+MgF<sub>2</sub>膜在紫外-真空紫外波段的反射率随波长及时间等的变化。将制备出的Al+MgF<sub>2</sub>膜用于光栅及铝漫反射板等紫外-真空紫外元件,取得了较好的效果。

## 2 理论计算

首先根据光学薄膜的电磁场理论推导出Al+MgF<sub>2</sub>膜反射系数 $r$ 。与一般的膜层不同,氟化镁膜对真空紫外辐射具有一定的吸收作用,为了准确估算氟化镁膜厚度对整个Al+MgF<sub>2</sub>膜反射率的影响,引入氟化镁膜的复折射率 $N_1$ ,且 $N_1 = n_1 - ik_1$ , $n_1$ 和 $k_1$ 分别是氟化镁膜的折射率和消光系数。根据光学薄膜的电磁场理论<sup>[3]</sup>推导出单层氟化镁膜的特征矩阵 $M$ 为

$$M = \begin{bmatrix} \frac{e^{i\varphi} + e^{-i\varphi}}{2} & \frac{e^{i\varphi} - e^{-i\varphi}}{2N_1} \\ \frac{N_1(e^{i\varphi} - e^{-i\varphi})}{2} & \frac{e^{i\varphi} + e^{-i\varphi}}{2} \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中 $\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} N_1 h \cos\theta$ , $\lambda$ 为入射波长, $h$ 为氟化镁膜的厚度, $\theta$ 为光线经过空气与氟化镁的交界面后,在氟化镁膜内的折射角,正入射时 $\cos\theta = 1$ 。如果令单层氟化镁膜的特征矩阵 $M$ 表示为

$$M = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \quad (2)$$

则整个Al+MgF<sub>2</sub>膜的反射系数 $r$ 为

$$r = \frac{A + BN_2 - C - DN_2}{A + BN_2 + C + DN_2} \quad (3)$$

式中 $N_2$ 是铝的复折射率, $N_2 = n_2 - ik_2$ , $n_2$ 和 $k_2$ 分别是铝膜的折射率和消光系数。将 $r$ 中的 $A$ 、 $B$ 、 $C$ 和 $D$ 用(1)式中的各项表示有

$$r = \frac{e^{i2\delta}E + F}{e^{i2\delta}G + H} \quad (4)$$

其中  $E = N_1 + N_2 - N_1^2 - N_1N_2$  (4 1)

$F = N_1 - N_2 + N_1^2 - N_1N_2$  (4 2)

$G = N_1 + N_2 + N_1^2 + N_1N_2$  (4 3)

$H = N_1 - N_2 - N_1^2 + N_1N_2$  (4 4)

反射系数  $r$  与其共轭复数之积即为 Al+MgF<sub>2</sub> 膜的反射率  $R$ 。

分别计算了波长为 120、150 和 220nm 时, Al+MgF<sub>2</sub> 膜的反射率随氟化镁膜厚度的变化。计算结果如图 1 所示。结果表明, 氟化镁膜的厚度在 25nm 附近时, Al+MgF<sub>2</sub> 膜在 120nm 处的反射率大于 150nm 附近的反射率。氟化镁膜的厚度为 40nm 时, Al+MgF<sub>2</sub> 膜在 150nm 处的反射率远远大于 120nm 附近的反射率。220nm 时, Al+MgF<sub>2</sub> 膜的反射率受氟化镁膜厚度的影响不大, 其反射率在 90% 附近变化。由计算结果可知, 氟化镁膜不但可以抑制铝膜的氧化, 而且由于它的干涉作用, 只要氟化镁膜的厚度适当, Al+MgF<sub>2</sub> 膜的反射率比单层新鲜铝膜的反射率还要高。

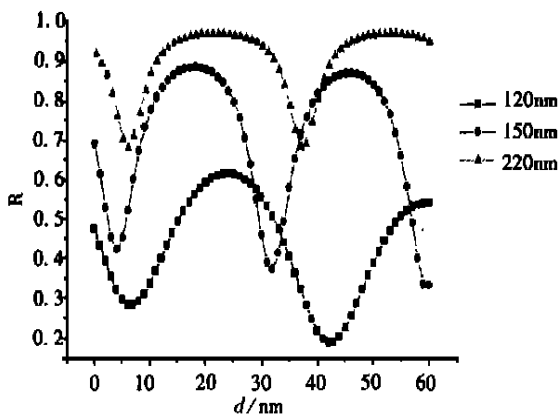


Fig 1 Reflectance of Al+MgF<sub>2</sub> vs thickness of MgF<sub>2</sub>

### 3 制备

在 Al+MgF<sub>2</sub> 膜的制备过程中, 对制备工艺有严格的要求。影响 Al+MgF<sub>2</sub> 膜反射率的主要因素有: 基片的粗糙度、铝的纯度、蒸发速率、镀膜系统的真空度、沉积铝和氟化镁的过程中基片的温度。

基片表面几何粗糙引起散射, 从而造成膜层反射率的降低。虽然在 2 中对 Al+MgF<sub>2</sub> 膜的反射率进行了理论估算, 但表面实际反射率还与基

片表面的粗糙度有关<sup>[4]</sup>, 具体如下:

$$R = R_0 \exp[-2(\frac{2\pi\delta\cos\theta}{\lambda})^2] \quad (5)$$

其中,  $R$  和  $R_0$  分别为实际和理想表面的反射率,  $\delta$  为基片表面粗糙度的均方根值,  $\lambda$  为入射波长,  $\theta$  为入射角, 正入射时  $\cos\theta = 1$ 。以 150nm 为例, 假设理论反射率为 80%, 当基片表面粗糙度均方根为 4nm 时, 其实际反射率下降至 75%, 因此对镀膜的基底表面应进行超精加工, 要求表面粗糙度均方根值小于 1.0nm。拟选用熔石英作基底材料, 它的热稳定性好, 硬度高, 易于加工出高精度的超光滑表面。

铝的纯度对真空紫外波段的反射率影响很大。纯度为 99.99% 和 99.5% 的铝, 在真空紫外波段的反射率可相差 10% 左右。

蒸发铝的速率慢、镀膜系统真空度较低都会导致铝的氧化, 所以铝应以很高的蒸发速率蒸发; 并且在蒸发过程中系统要保持一定的真空度 (约为  $10^{-3}$ Pa 或更低的压强)。

大多数材料在热基底时沉积出的膜与基底有较好的附着性, 但真空紫外波段的辐射, 其波长相对较短, 随基底温度升高, 氟化镁的颗粒变大, 铝膜表面变得相对粗糙起来, 降低了这一波段的反射率, 所以基底温度一般不应过高。

### 4 反射率测量装置及测量结果

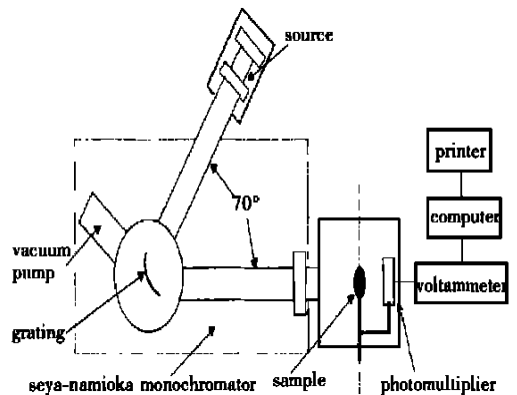


Fig 2 Schematic diagram of Seya-Namioka UV-VUV reflectometer

制备出的 Al+MgF<sub>2</sub> 膜用 Seya-Namioka 真空紫外反射率计测量其镜面反射率。Seya-Namioka 真空紫外反射率计如图 2 所示, 采用空阴极光源, 空阴极光源的工作气体是纯度为 99.999% 的氮气, 工作气压为  $10^3$ Pa, 工作电流为

250mA。所用其放电发射的特征波长为 149.2、174.2、252.0、300.0 和 340.0nm。通过一级差分泵单元将空阴极光源与单色仪的入射狭缝连接起来, Seya-Namiooka 真空紫外单色仪的工作波段为 50nm~500nm, 单色仪工作的真空度最低达 10<sup>-3</sup> Pa。由计算机控制步进电机通过正弦机构转动光栅以完成波长扫描。

反射计由真空室、样品架和探测器组成。由单色仪出射的真空紫外辐射经样品表面反射到探测器上。放在样品架上的待测样品和探测器可绕共同的旋转轴旋转。样品架的调节机构可以使样品处于所要求的任意入射角。探测器调整机构使探测器绕它与样品共同的旋转轴在 25 至 170° 之间任意位置读取反射光强。所用探测器为 R928 型光电倍增管。在光电倍增管前装有水杨酸钠荧光屏, 可将真空紫外辐射转化为可见辐射以便接收。反射计中的真空度为 10<sup>-3</sup> Pa, 在真空室外通过真空密封转轴完成样品和探测器的转动以及样品的移入/出光路。探测器的输出经数字电压表最终由计算机处理数据并输出测试结果。

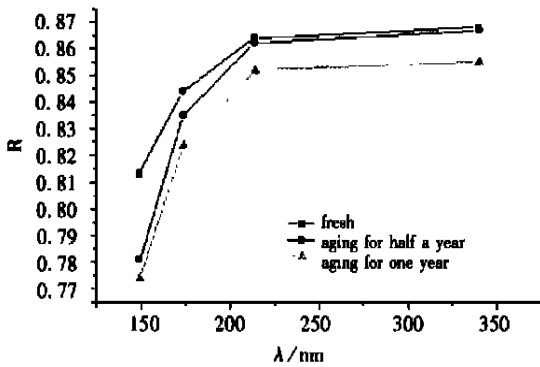


Fig 3 Reflectance of Al+MgF<sub>2</sub> vs wavelength and time

图 3 给出新鲜 Al+MgF<sub>2</sub> 膜反射率及其随时间的变化, 图 4 给出 Al+MgF<sub>2</sub> 膜在 55 °C 的温度下保存 12 小时后其反射率变化。从测试结果可知, Al+MgF<sub>2</sub> 膜存放半年后, 其反射率在

149.2nm 处下降约为 3%, 存放一年后, 149.2nm 处下降约为 4%, 在 174.2nm 处下降约为 2%, 其反射率 200nm 以上基本稳定。将 Al+MgF<sub>2</sub> 膜置于 55 °C 的温度下保存 12 小时后, 在测量误差范围内, 其反射率不变, 保持在 80% 以上。

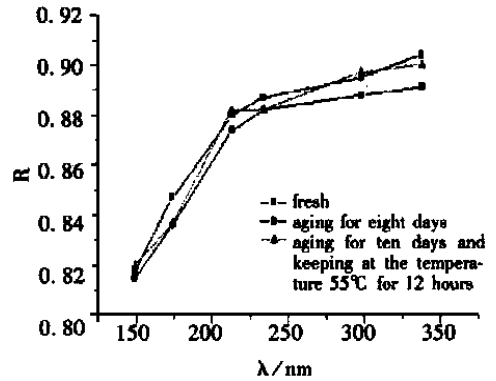


Fig 4 Reflectance of Al+MgF<sub>2</sub> after keeping at the temperature 55 °C for 12 hours

Al+MgF<sub>2</sub> 膜除用作反射镜的增反膜, 还用作铝漫反射板和光栅的增反膜。镀 Al+MgF<sub>2</sub> 膜后, 漫反射板的反射能力依 Al+MgF<sub>2</sub> 膜反射率的高低有不同程度的提高, 光栅的效率在 149.2nm 处有明显提高, 提高了约 50%。

### 5 结 论

综上所述, 考虑氟化镁膜在真空紫外波段的吸收作用, 根据光学薄膜的电磁场理论研究了氟化镁厚度对 Al+MgF<sub>2</sub> 膜反射率的影响, 氟化镁膜一方面抑制铝膜在大气中的氧化, 另一方面, 由于干涉作用, 适当厚度的氟化镁膜还可以提高整个反射膜的反射能力。研究了 Al+MgF<sub>2</sub> 膜的制备工艺, 制备出的 Al+MgF<sub>2</sub> 膜反射率在紫外-真空紫外波段可以达到 80% 以上, 并且随时间和温度基本保持稳定, 可以提高紫外-真空紫外元件的反射能力。

### 参考文献:

[1] Hass G, Hunter W R, Tousey R. Reflectance of evaporated aluminium in the vacuum ultraviolet[J]. J. Opt Soc Am., 1956, 46(12): 1009- 1012

[2] Samson James A R. Techniques of vacuum ultraviolet spectroscopy[M]. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1967.

[3] 严瑛白. 应用物理光学[M]. 北京: 机械工业出版社, 1990

[4] Steans D G. The scattering of X-rays from nonideal multilayer structures[J]. J. Appl Phys, 1989, 65(2): 491-506

## MgF<sub>2</sub>-overcoated aluminum films for ultraviolet and vacuum ultraviolet

LU Ying, LI Fu-tian

(State Key Lab of Applied Optics, Changchun Institute of Optics,  
Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130022, China)

**Abstract:** MgF<sub>2</sub>-overcoated aluminum films are often used in the spectral range of vacuum ultraviolet. According to the theory of electromagnetism, reflectance of Al+MgF<sub>2</sub> at normal incident was calculated in the way of matrix optics where the optical constant of MgF<sub>2</sub> was taken as a complex number. The effect of thickness of MgF<sub>2</sub> on the reflectance of Al+MgF<sub>2</sub> coatings was considered. The MgF<sub>2</sub> not only prevents the aluminum from being oxidized, but also increases the reflectance of Al+MgF<sub>2</sub> by interference. The reflectance of Al+MgF<sub>2</sub> at incident angle of 10° from 150nm~340nm is above 80% which was measured by Seya-Namioka UV-VUV reflectometer. The reflectance of Al+MgF<sub>2</sub> does not change distinctly after the aging of one year or keeping at the temperature of 55 °C for 12 h. The paper also discusses the preparation of Al+MgF<sub>2</sub> films.

**Key words:** coatings of Al+MgF<sub>2</sub>; ultraviolet; vacuum ultraviolet; reflectivity

**作者简介:** 刘颖(1972-),女,汉,天津市人,1994年毕业于长春光学精密机械学院,现为中国科学院长春光学精密机械与物理研究所应用光学国家重点实验室博士生,主要从事短波光学方面的研究工作。