

文章编号 1004-924X(2013)06-1380-07

极紫外 Mg/SiC、Mg/Co 多层膜的稳定性

朱京涛*, 宋竹青, 丁 涛, 马 爽, 李浩川

(同济大学 物理科学与工程学院 精密光学工程技术研究所, 上海 200092)

摘要:采用磁控溅射法在 Si(100)基底上镀制了膜系结构分别为 $[\text{Mg}/\text{Co}]_{20}$ 、 $[\text{Mg}/\text{SiC}]_{20}$ 的两组多层膜, 以研究 Mg 基多层膜的稳定性。对放置在室温和 80% 相对湿度环境下的样品进行显微镜、表面粗糙度和 X 射线掠入射反射率测试, 对比研究了 Mg/Co 和 Mg/SiC 两种多层膜结构在相同环境中的损坏状况。对比结果显示: 放置 4 天后, Mg/SiC 损坏面积为 26.34%, 表面粗糙度为 10 nm; Mg/Co 的损坏面积为 2.78%, 表面粗糙度为 5 nm。6 天后, X 射线掠入射反射率测量显示 Mg/SiC 多层膜一级反射峰完全消失, 而 Mg/Co 多层膜的一级反射峰仍有 47.63% 的反射率。实验表明, Mg/Co 多层膜的表面层和内部多层膜结构的损坏速度较 Mg/SiC 慢, 具有较好的环境稳定性。另外, X 射线光电子谱(XPS)测试 Mg 基多层膜损坏后的产物主要为 MgCO_3 、 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 和少量的 MgO , 且内层 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 与 MgCO_3 含量的比值显著高于表面层。分析认为, 水汽是造成 Mg 基多层膜损坏的主要原因, 今后 Mg 基多层膜保护层的研究可主要针对如何防止水汽进入膜层。

关键词:极紫外多层膜; 多层膜反射镜; 稳定性; 湿度

中图分类号: O484.1 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20132106.1380

Stability of Mg/SiC, Mg/Co EUV multilayers

ZHU Jing-tao*, SONG Zhu-qing, DING Tao, MA Shuang, LI Hao-chuan

(Institute of Precision and Optical Engineering, School of Physics Science and Engineering,
Tongji University, Shanghai 200092, China)

* Corresponding author, E-mail: jtzhu@tongji.edu.cn

Abstract: To research the stability of Mg-based multilayers, two groups of multilayers, $[\text{Mg}/\text{Co}]_{20}$ and $[\text{Mg}/\text{SiC}]_{20}$ were coated on a Si(100) substrate by magnetron sputtering method. The two samples were tested by a microscopy, a surface roughness experiment and an X-ray grazing incidence reflectivity test at room temperature and a relative humidity of 80%. The contrast experiments on multilayer damage for Mg/Co and Mg/SiC were performed in the same condition. The results show that after being exposed in the atmospheric environment for 4 days, the damaged area and surface roughness of the Mg/SiC multilayer sample are up to 26.34% and 10 nm, respectively, while those of the Mg/Co multilayer sample are 2.78% and 5 nm, respectively. After 6 days, the 1st reflection peak of Mg/SiC sample is completely disappeared, and Mg/Co sample still has a peak of 47.63% reflectivity. The experimental results show that the Mg/Co multilayer sample has a better environmental stability as compared with the Mg/SiC multilayer. The X Photoelectron Spectroscopy (XPS) shows that the produc-

收稿日期: 2013-01-11; 修订日期: 2013-03-14.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 10905042, 11061130549); 国家 973 重点基础研究发展计划资助项目 (No. 2011CB922203)

tions of the damaged Mg-based multilayers are mainly MgCO_3 , $\text{Mg}(\text{OH})_2$ and modest MgO . Moreover, the content ratio of $\text{Mg}(\text{OH})_2$ and MgCO_3 in the inner layer is significantly higher than that in the surface layer. Experimental results suggest that the reason for Mg-based multilayer damage is the erosion of $\text{H}_2\text{O}(\text{g})$, so the capping layer of Mg-based multilayer should prevent the $\text{H}_2\text{O}(\text{g})$ penetrating into the multilayer.

Key words: Extreme Ultraviolet(EUV) multilayer; multilayer mirror; stability; humidity

1 引言

极紫外波段多层膜反射镜在极紫外光刻^[1]、同步辐射^[2-4]和天文观测等方面具有广泛的应用,特别是太阳光谱中有多条谱线位于极紫外波段,例如 He-II(波长为 30.4 nm)光谱,它的观测已成为近年来的研究热点^[5-7]。Mg 的 L 吸收边位于 25.2 nm,因此,在 25.2~40 nm 波段 Mg 基多层膜比传统的 Mo/Si 多层膜具有更高的理论反射率。入射角为 10° 时,Mg/SiC 在 30.4 nm 处的峰值反射率可达到 43%^[8-9]。Mg/Co 多层膜反射镜在 30 nm 附近正入射的反射率为 40.3%,半高宽为 1.3 nm^[10]。Mg 是一种活泼的金属材料,在大气环境中容易被氧化,Mg 的熔点也很低(649 $^\circ\text{C}$)。为了解 Mg 基多层膜的稳定性,近几年国内外对 Mg 基多层膜进行了一系列的研究。Mg/SiC 多层膜在 200 $^\circ\text{C}$ 以内有较好的热稳定性;退火温度在 200~300 $^\circ\text{C}$ 时,Mg 膜层的结晶导致粗糙度剧增,反射率急剧下降;温度升高到 350~400 $^\circ\text{C}$ 时,界面中有 Mg_2Si 生成^[11]。Mg/Co 多层膜比 Mg/SiC 多层膜具有更好的热稳定性,退火至 300 $^\circ\text{C}$ 时,多层膜结构没有显著变化。在 Mg/Co 多层膜中引入 Zr 阻隔层后,制备的 Mg/Zr/Co/Zr 多层膜的稳定温度提高到 400 $^\circ\text{C}$,热稳定性显著提高,而且反射率没有降低^[12]。实验发现,Mg/SiC 多层膜在潮湿环境中极易损坏,但在室温干燥的环境中即使存放 4~5 年,其 30.4 nm 处的反射率仍为 40%^[13-14]。Mg 基多层膜损坏的原因为空气中的水汽与 Mg 膜层发生反应。本文制备了 Mg/Co、Mg/SiC 多层膜并研究了它们在相同环境下的损坏情况,以了解 Mg 基多层膜的稳定性。对比实验表明,Mg/Co 多层膜不仅在热稳定性上优于 Mg/SiC 多层膜,在高湿度环境中的损坏速度也显著慢于 Mg/SiC 多层膜。

2 多层膜的设计和制备

Mg 在 30.4 nm 处的光学常数为 $n = 0.9877, k = 0.0028$ ^[15], 较低的吸收系数使 Mg 基多层膜如 Mg/Co、Mg/SiC 在 30.4 nm 处均有较高的理论反射率。本文采用磁控溅射在 15 mm×15 mm 的 Si(100) 基底上镀制 Mg/Co 和 Mg/SiC 多层膜。制备时本底真空为 8×10^{-5} Pa, 充气流量为 15 cm^3/min , Ar 气溅射气压约为 0.2 Pa。图 1 给出了以 30.4 nm 为目标波长, 10° 入射角优化设计、制备的 Mg/Co、Mg/SiC 多层膜的理论 and 测量反射率。Mg/Co、Mg/SiC 多层膜样品的周期数均为 $N = 30$, 厚度比(γ 值, Co 或 SiC 占比)分别为 0.18, 0.26。测试设备为国家同步辐射实验室 U27 光束线上的反射率计,采用 Al 滤片抑制高次谐波。如图 1 所示,Mg/SiC、Mg/Co 多层膜在 30.4 nm 处的理论反射率分别为 56.4%、42.7%, 测量反射率分别为 37.4%、40.0%。

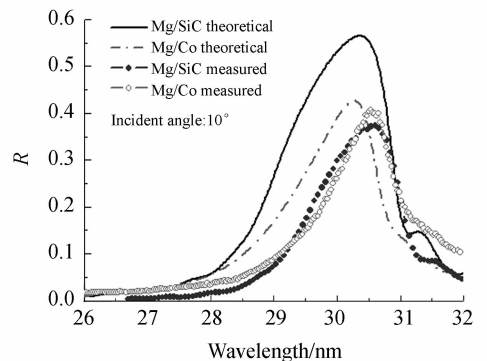


图1 Mg/Co、Mg/SiC 多层膜在 30.4 nm 处的理论和测量反射率

Fig. 1 Theoretical and measured reflectivities of Mg/Co, Mg/SiC multilayers at 30.4 nm

为保证对比实验的准确性, Mg/Co 和 Mg/SiC 多层膜具有相同的膜系结构:膜层周期数 N

$= 20$, $\gamma = 0.26$, 周期厚度分别为 $D_{\text{Mg/Co}} = 17.94 \text{ nm}$, $D_{\text{Mg/SiC}} = 17.52 \text{ nm}$ 。制备过程中, 两组 Mg 基多层膜的镀制参数相同。

3 环境稳定性对比实验及结果分析

制备的 Mg/SiC 和 Mg/Co 多层膜样品被同时放入湿度恒定的控湿柜中进行环境实验, 控湿柜中的湿度保持在 80%RH(室温为 25 °C), 制备和测试实验室的相对湿度为 65%RH(室温为 25 °C)。湿度示数均经过干湿球湿度计校准。采用高倍率光学显微镜测试样品表面、X 射线掠入射反射 (Grazing Incidence X-ray Reflectivity, GIXRR) 测试多层膜膜层结构随环境实验时间的变化。环境实验和测试过程中, 所用样品均同时置于相同的湿度以减少测试时的干扰。

3.1 表面形貌测试

采用 Leica DM4000 M 光学显微镜观察样品表面。图 2 为在高湿度环境中 Mg/Co 多层膜不同时间的样品表面变化情况, 图 3 为相同条件下 Mg/SiC 表面的变化情况。目镜放大倍率为 10 倍, 物镜放大倍率为 5 倍, 测试面积为 $2.0 \text{ mm} \times 1.5 \text{ mm}$, 测试图片均为样品中心位置。其中 Day 1 是制备后, 环境稳定性测试实验前的测试结果, 为多层膜的初始状态。对比图 2、图 3 可知, 相同放置时间下, Mg/Co 多层膜表面损坏黑点数量和面积均显著小于 Mg/SiC 多层膜。

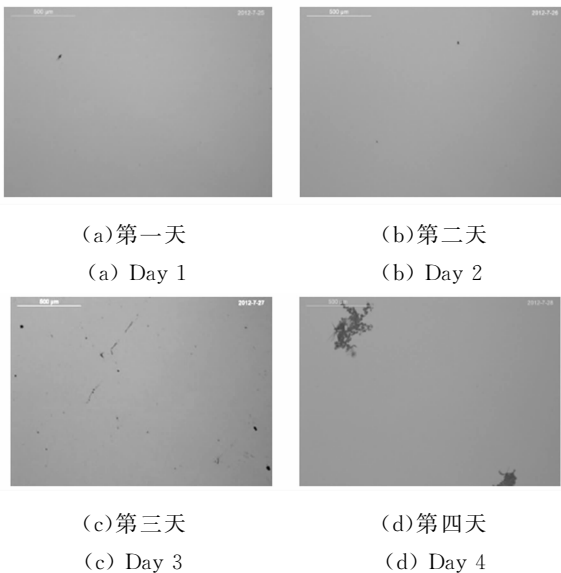


图 2 Mg/Co 多层膜样品显微镜测试
Fig. 2 Microscope tests of Mg/Co multilayer sample

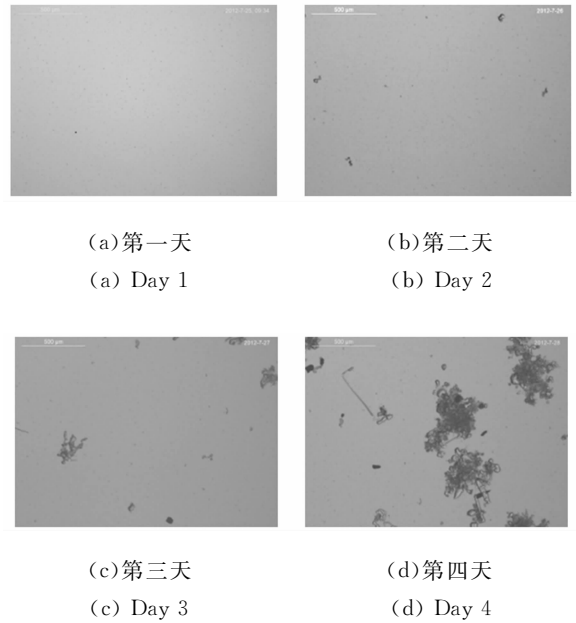


图 3 Mg/SiC 多层膜显微镜测试
Fig. 3 Microscope tests of Mg/SiC multilayer sample

为具体分析损坏情况, 使用 ImageJ 软件^[16]对显微镜测试图像进行处理, 并统计不同放置时间后 Mg/SiC 和 Mg/Co 多层膜的损坏斑点数量和损坏面积, 如表 1 所示。前 3 天损坏斑点直径在微米量级, 采用 500 倍的放大倍率的测试图像进行处理; 至第 4 天时, Mg/SiC 和 Mg/Co 多层膜表面均有大面积的损坏斑点, 高倍率视野无法覆盖损坏区域, 故采用 50 倍的放大倍率测试图像分析。

表 1 Mg/Co、Mg/SiC 多层膜损坏斑点数量和损坏面积
Tab. 1 Damaged spot numbers and areas of Mg/Co and Mg/SiC multilayers

	Mg/Co		Mg/SiC	
	损坏斑点数量	损坏面积比率/(%)	损坏斑点数量	损坏面积比率/(%)
Day 1	4	0.004	167	0.394
500× Day 2	4	0.015	257	0.874
Day 3	22	0.023	428	2.215
50× Day 4	-	2.778	-	26.340

3.2 表面粗糙度测试

采用 Bruker 公司的 ContourGT-X 白光干涉仪对样品的表面粗糙度进行对比测量, 干涉仪有两种常用的测量模式, 分别为相移干涉 (Phase Shifting Interferometry, PSI) 和垂直扫描干涉

(Vertical Scanning Interferometry, VSI)。PSI 为精确测量模式,通常用来测量平滑、连续的表面,测试精度可达亚纳米级。VSI 模式用于测量更粗糙的表面,或者具有较大高度差的表面,但测试精度要低于 PSI 模式。测试点均为样品的中心位置附近,取 3 次测量平均值。测试数据见表 2。

表 2 多层膜样品中心位置表面均方根粗糙度

Tab. 2 RMS roughness of multilayer sample surfaces (nm)

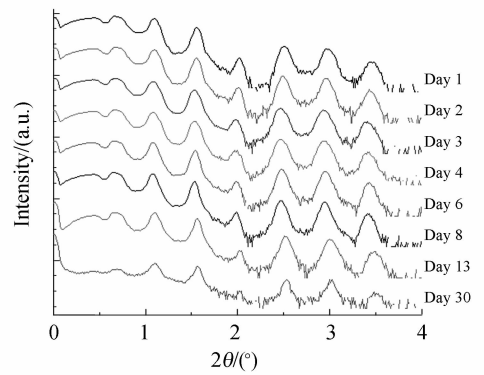
	Day 1	Day 2	Day 3	Day 3	Day 4
	(PSI)	(PSI)	(PSI)	(VSI)	(VSI)
Mg/Co	0.29	0.34	0.98	4.58	5.09
Mg/SiC	0.72	1.43	2.15	10.93	9.24

测试表明,Mg/Co 多层膜样品的粗糙度在第一天和第二天之间并没有明显的增加,但到第三天时,粗糙度变化较大,不再适用于 PSI 测量模式。同样条件下,Mg/SiC 多层膜表面较 Mg/Co 多层膜粗糙,在 80% RH 湿度环境中存放一天后,Mg/SiC 表面粗糙度即有显著增加。PSI 和 VSI 两种模式下的测量结果均表明,在 80% RH 湿度环境中 Mg/SiC 多层膜的表面粗糙度及其增量均显著大于 Mg/Co 多层膜。

3.3 X 射线掠入射反射(GIXRR)测试

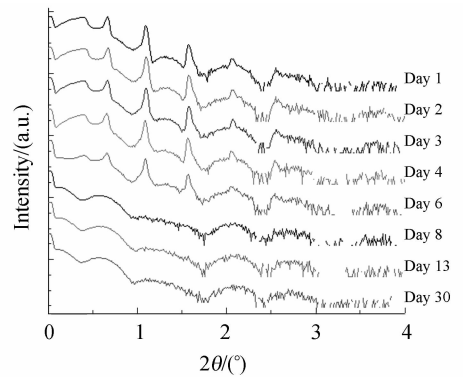
采用 X 射线衍射仪(英国 Bede 公司 D1 系统,Cu 的 $K\alpha$ 射线, $\lambda=0.154\text{ nm}$)来表征多层膜的结构信息。由于在不同入射角度下,X 射线在多层膜中的穿透深度不同,GIXRR 曲线中不同的 Bragg 反射峰表征的膜层位置深度有所不同:全反射峰和一级峰等较低级次的反射峰主要包含表面膜层的结构信息,而较高级次的反射峰主要受膜层内部结构的影响。

图 4(a)和(b)分别为 Mg/Co 和 Mg/SiC 多层膜在相对湿度为 80% RH 环境中存放一定时间后的 X 射线掠入射反射测试曲线。其中,Day 1 是刚制备的多层膜 GIXRR 测试曲线(为显示清楚,图中将测试曲线纵坐标错开 3 个量级)。Mg/SiC 样品测试曲线的全反射峰和一级 Bragg 反射峰随实验时间的延长而迅速下降:第三天的测试曲线全反射峰和一级 Bragg 反射峰均开始有明显的下降;第六天的测试曲线中,第二、三级次反射峰显著降低;至第八天时,测试曲线中只有打



(a) Mg/Co 多层膜

(a) Mg/Co multilayers



(b) Mg/SiC 多层膜

(b) Mg/SiC multilayers

图 4 不同环境实验时间后的 Mg/SiC 多层膜掠入射反射曲线

Fig. 4 XRR curves of multilayers exposed in high humidity air for different days

底膜层的反射峰,Mg/SiC 多层膜的 Bragg 反射峰完全消失,多层膜结构消失,样品完全损坏。

Mg/Co 多层膜掠入射反射曲线的各级反射峰在前 3 天中没有明显的下降,第八天时的全反射峰和一级 Bragg 峰仍有 36.80% 和 47.63% 的反射率,更高级次的反射峰没有明显的降低。此时,Mg/Co 多层膜的损坏主要在表面层,内部仍为多层膜结构。在 80% RH 的环境中保存一个月之后,Mg/Co 多层膜仍可以测得各级次的反射峰。除多层膜结构的损坏外,反射峰峰值降低的另一个原因可能为多层膜损坏后生成的化合物对测试 X 射线的吸收。

表 3 为 GIXRR 测得的 Mg/Co 和 Mg/SiC 多

层膜样品掠入射反射曲线的一级峰反射率。根据表 3 中两种多层膜样品一级峰反射率随放置时间的变化数据绘制图 5。图 5 中曲线下降的斜率表示薄膜损坏的快慢, Mg/SiC 多层膜一级峰反射率变化曲线的斜率约为 Mg/Co 多层膜的 2 倍。

表 3 Mg/Co 和 Mg/SiC 多层膜 X 射线掠入射反射曲线全反射峰和一级峰反射率

Tab. 3 Total reflections and 1st peak reflections of Mg/Co and Mg/SiC multilayers

	Mg/Co		Mg/SiC	
	全反射峰	一级峰	全反射峰	一级峰
Day1	0.488 8	0.631 1	0.454 5	0.508 4
Day2	0.490 4	0.614 2	0.432 0	0.467 8
Day3	0.487 0	0.604 0	0.346 4	0.405 8
Day4	0.436 5	0.550 3	0.220 2	0.277 0
Day6	0.416 3	0.538 8	0.052 6	0.075 0
Day8	0.368 0	0.476 3	—	—
Day13	0.081 0	0.122 6	—	—
Day30	0.002 0	0.002 6	—	—

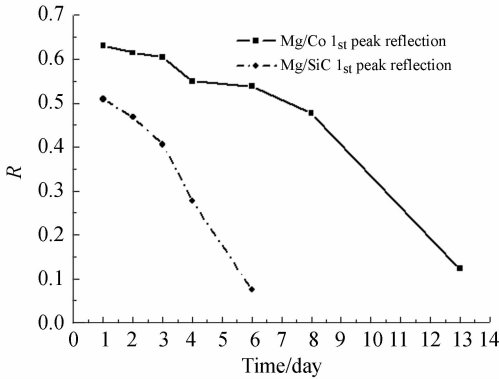


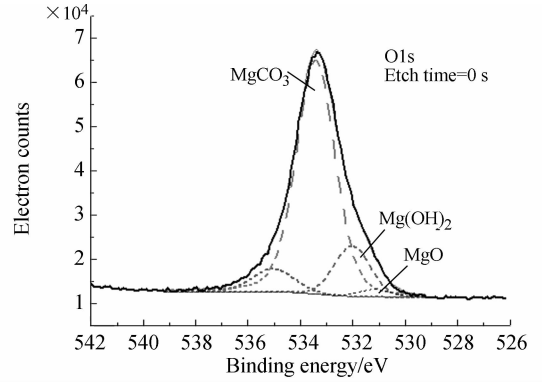
图 5 Mg/Co 和 Mg/SiC 多层膜 X 射线掠入射反射曲线一级峰反射率

Fig. 5 First peak reflections of Mg/Co and Mg/SiC multilayers

光学显微镜测试、表面粗糙度测试和 X 射线掠入射反射率测试结果均表明, Mg/SiC 多层膜表面损坏和其结构的损坏速度均显著快于 Mg/Co 多层膜。Mg/SiC 多层膜的损坏速度约为 Mg/Co 多层膜损坏速度的 2~3 倍。

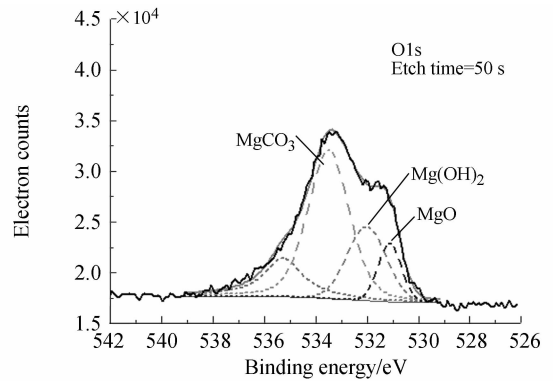
3.4 X 射线光电子谱 (XPS) 测试

为研究膜层的损坏机理, 使用 X 射线光电子谱 (X-ray Photoelectron Spectroscopy, XPS) 分析了膜层损坏后的成分。采用赛默飞世尔公司的 K-Alpha 型 XPS 测试仪对损坏后的多层膜样品



(a) 表层 O1s 能谱曲线

(a) O1s spectra on multilayer surface



(b) Ar 粒子束刻蚀 50s 后 O1s 能谱曲线

(b) O1s spectra after 50s Ar+ ion sputtering

图 6 损坏后的 Mg/Co 多层膜 XPS 测试

Fig. 6 XPS O1s spectra of Mg/Co multilayers exposed in high humidity air for one month

进行 XPS 测试。测试光源为 Al 的 K- α 线, 光斑直径为 400 μm , 通能为 50 eV, 步进为 0.1 eV, 以 C-C(286.5 eV) 结合能为标准对能谱进行校正。如图 6 所示, 损坏后的 Mg/Co 样品表面的 XPS 谱 O1s 峰和 Mg1s 峰分别位于 533.3 eV 和 1 305.7 eV。多层膜损坏后 Mg 的生成物主要为 MgCO₃、Mg(OH)₂ 和少量的 MgO, 这一结果与文献报导相符^[17-18]。对损坏后的 Mg/Co 样品离子束刻蚀 50 s 后, O1s 谱发生了明显的改变, CO₃²⁻ 含量下降, OH⁻ 含量上升。Regina Soufli 等研究表明, Mg/SiC 多层膜的损坏在于表层的 SiC 膜层不能有效地隔绝空气^[19]。Mg 膜层与侵入的 H₂O(g) 反应生成 Mg(OH)₂, 与空气中的 CO₂ 进一步反应生成 MgCO₃, 损坏由表面层侵入到内层。Mg/Co 多层膜的环境稳定性优于 Mg/SiC 膜层, 可能是因为金属 Co 膜层较 SiC 膜层致

密。具体的损伤机理有待进一步研究。今后将重点研究 Mg 基多层膜的保护层,现有研究结果表明,保护层将主要针对如何防止水汽进入膜层。

4 结 论

本文采用磁控溅射在 Si(100) 基底上镀制膜系结构分别为 $[\text{Mg}/\text{Co}]_{20}$ 、 $[\text{Mg}/\text{SiC}]_{20}$ 的两组多层膜,通过对放置在室温条件下 80%RH 的相对湿度环境中的样品进行显微镜、表面粗糙度测试和 X 射线掠入射反射率测试,对比研究了 Mg/Co 和 Mg/SiC 两种多层膜结构的环境稳定性。放置 4 天后, Mg/SiC 损坏面积为 26.34%, 表面粗糙

度约为 10 nm; Mg/Co 的损坏面积约为 2.78%, 表面粗糙度为 5 nm。6 天后, Mg/SiC 多层膜 GIXRR 一级反射峰完全消失, Mg/Co 多层膜一级峰反射率为 47.63%。结果显示 Mg/Co 多层膜有较好的环境稳定性。XPS 测试出 Mg 基多层膜损坏后的产物主要为 MgCO_3 、 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 和少量的 MgO, 且内层 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 与 MgCO_3 含量的比值高于表面层。研究表明,水汽是造成 Mg 基多层膜损坏的主要原因,湿度是影响 Mg 基多层膜稳定性的重要因素。今后需要进一步采用 SEM 分析 Mg/SiC 和 Mg/Co 多层膜表面的损坏形貌,并采用保护层方法提高 Mg 多层膜的稳定性,重点防止水汽对膜层的侵蚀。

参考文献:

- [1] SPILLER E. High performance multilayer coatings for EUV lithography [J]. *SPIE*, 2004, 5193:89-97.
- [2] ATTWOOD D. *Soft X-rays and EUV Radiation Principles and Applications* [M]. New York: Cambridge University Press, 2000.
- [3] KORTRIGHT J B, RICE M, CARR R. Soft-X-ray Faraday rotation at Fe L_{2,3} edges [J]. *Physical Review B*, 1995, 51(15):10240-10244.
- [4] PLATONOV Y, BROADWAY D, DEGROOT B, et al.. Deposition of X-ray multilayers on long size substrates for synchrotron applications [J]. *SPIE*, 1997, 3152: 231-235.
- [5] WINDT D L, DONGUY S, SEELY J, et al.. EUV multilayers for solar physics [J]. *SPIE*, 2004, 5168: 1-11.
- [6] SUMAN M, MINAPELIZZO G M, WINDT D, et al.. Extreme-ultraviolet multilayer coatings with high spectral purity for solar imaging [J]. *Appl. Opt.*, 2009, 48(29): 5432-5437.
- [7] ZHU J T, WANG Z S, ZHANG Z, et al.. High reflectance multilayer for He-II radiation at 30.4 nm [J]. *Appl. Opt.*, 2008, 47:C310-C314.
- [8] PELIZZO M G, FINESCHI S, CORSO A J, et al.. Long-term stability of Mg/SiC multilayers [J]. *Optical Engineering*, 2012, 51(2):023801.
- [9] 朱京涛,黄秋实,白亮,等. 不同本底真空度下 SiC/Mg 极紫外多层膜的制备和测试[J]. *光学精密工程* 2009,17(12):2946-2951.
- [10] ZHU J T, ZHOU S K, LI H C, et al.. Comparison of Mg-based multilayers for solar He-II radiation at 30.4 nm wavelength [J]. *Appl. Opt.*, 2010, 49:3922-3925.
- [11] MAURY H, JONNARD P, LE GUEN K, et al.. Thermal cycles, interface chemistry and optical performance of Mg/SiC multilayer [J]. *Eur. Phys. J. B.*, 2008, 64:193-199.
- [12] ZHU J T, ZHOU S K, LI H C, et al.. Thermal stability of Mg/Co multilayer with B₁C, Mo or Zr diffusion barrier layers [J]. *Optics Express*, 2011,19(22):21849-21854.
- [13] TAKENAKA H, ICHIMARU S, OHCHI T, et al.. Soft-X-ray reflectance and heat resistance of SiC/Mg multilayer [J]. *J. of Electron Spectroscopy and Related Phenomena*, 2005, 144-147: 1047-1049.
- [14] EJIMA T, YAMAZAKI A, BANSE T, et al.. Aging and thermal stability of Mg/SiC and Mg/Y₂O₃ reflection multilayers in the 25-35 nm region [J]. *Appl. Opt.*, 2005, 44(26):5446-5453.
- [15] HENKE B L, GULLIKSON E M, DAVIS J C. X-ray interactions: photo absorption, scattering, transmission, and reflection at E=50-30 000 eV, Z=1-92[J]. *Atomic Data and Nuclear Data Table*, 1993,54(2):181-342.
- [16] ABRAMOFF M D, MAGELHAES P J, RAM S J. Image processing with Image [J]. *Biophotonics*
- [17] facture and measurement of SiC/Mg EUV multilayer mirrors in different base pressures [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(12):2946-2951. (in Chinese)

International, 2004, 11(7):36-42.

- [17] ARDIZZONE S, BIANCHI C L, FADONI M, *et al.*. Magnesium salts and oxide; an XPS overview [J]. *Applied Surface Science*, 1997,119:253-259.
- [18] VINCENT C B. *Handbook of Monochromatic XPS Spectra: The Elements and Native Oxides* [M].

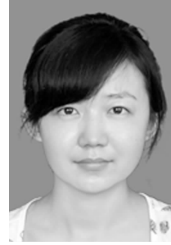
England: John Wiley & Sons, 2000.

- [19] SOUFLI R, NICA FERNÁNDEZ-PEREA M, BAKER S, *et al.*. Spontaneously intermixed Al-Mg barriers enable corrosion-resistant Mg/SiC multilayer coatings [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2012,101(4):04311-1-5.

作者简介:



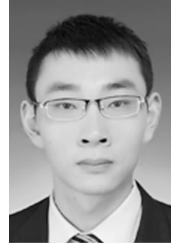
朱京涛(1978—),男,教授,博士生导师,2005年于复旦大学获得博士学位,主要从事极紫外与X射线光学薄膜与技术的研究。E-mail: jtzhu@tongji.edu.cn



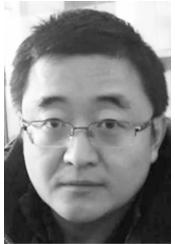
马爽(1985—),女,吉林长春人,博士研究生,2007年于延边大学获得学士学位,2011年于长春理工大学获得硕士学位,主要从事光学检测方面的研究。E-mail: 1110488@tongji.edu.cn



宋竹青(1987—),男,湖北随州人,硕士研究生,2010年于同济大学获得学士学位,主要从事极紫外多层膜的研究。E-mail: lanzhus@163.com



李浩川(1986—),男,重庆市人,博士研究生,2008年于复旦大学获得学士学位,主要从事极紫外与x射线光学方面的研究。E-mail: 1010103003@tongji.edu.cn



丁涛(1980—),男,山东人,讲师,博士,2002年,2005年于云南大学分别获得学士、硕士学位,2009年于复旦大学获得博士学位,主要从事高损伤阈值激光薄膜的研究。E-mail: dingtao@tongji.edu.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)