

引用格式: XIAO Liangsheng, QI Runze, LAI Bo, et al. Study on the Structure and Reflectivity of Yb/Al Multilayers Prepared by Different Base Pressure[J]. Acta Photonica Sinica, 2021, 50(11):1131001

肖两省, 齐润泽, 来搏, 等. 不同本底真空制备的 Yb/Al 多层膜结构和反射率研究[J]. 光子学报, 2021, 50(11):1131001

# 不同本底真空制备的 Yb/Al 多层膜结构和反射率研究

肖两省<sup>1</sup>, 齐润泽<sup>2,3</sup>, 来搏<sup>2,3</sup>, 黄秋实<sup>2,3</sup>, 吴佳莉<sup>2,3</sup>, 余越<sup>2,3</sup>, 辛子华<sup>1</sup>

(1 上海大学 物理系, 上海 200444)

(2 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)

(3 先进微结构材料教育部重点实验室, 上海 200092)

**摘要:** 为研究本底真空对 Yb/Al 多层膜微结构和光学性能的影响, 使用直流磁控溅射设备, 在本底真空度分别为  $4 \times 10^{-5}$  Pa、 $8 \times 10^{-5}$  Pa、 $1 \times 10^{-4}$  Pa、 $2 \times 10^{-4}$  Pa 和  $4 \times 10^{-4}$  Pa 条件下, 制备了一组结构相同的 SiC/(Yb/Al)<sub>3</sub> 周期多层膜。使用 X 射线掠入射反射、原子力显微镜及大角 X 射线衍射等方法表征了样品表面和内部结构, 结果表明: 当本底真空度从  $4 \times 10^{-4}$  Pa 提高至  $4 \times 10^{-5}$  Pa 时, Yb/Al 多层膜的平均界面宽度从 2.15 nm 减小到 1.82 nm; 表面粗糙度从 1.87 nm 减小到 1.43 nm; 膜层内有 Yb、Yb<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 和 Al 结晶, 结晶尺寸随真空度略有增加。SiC/(Yb/Al)<sub>3</sub> 周期多层膜为张应力, 当本底真空度从  $4 \times 10^{-4}$  Pa 提升至  $4 \times 10^{-5}$  Pa 时, 应力从 85 MPa 增大到 142 MPa。测试了本底真空度为  $4 \times 10^{-5}$  Pa 时制备的多层膜样品的反射率, 在波长为 73.6 nm、入射角为 5° 时, 反射率为 31.3%。

**关键词:** 紫外辐射; 真空沉积; 多层膜; 反射; 磁控溅射

中图分类号: O484.1

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20215011.1131001

## Study on the Structure and Reflectivity of Yb/Al Multilayers Prepared by Different Base Pressure

XIAO Liangsheng<sup>1</sup>, QI Runze<sup>2,3</sup>, LAI Bo<sup>2,3</sup>, HUANG Qiushi<sup>2,3</sup>, WU Jiali<sup>2,3</sup>, YU Yue<sup>2,3</sup>,  
XIN Zihua<sup>1</sup>

(1 Department of Physics, Shanghai University, Shanghai 200444, China)

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

(3 MOE Key Laboratory of Advanced Micro-Structured Materials, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** In order to study the effect of base pressure on the microstructure and optical properties of Yb/Al multilayers, a series of SiC/(Yb/Al)<sub>3</sub> period multilayers with the same structure were prepared by DC magnetron sputtering under base pressure conditions of  $4 \times 10^{-5}$  Pa,  $8 \times 10^{-5}$  Pa,  $1 \times 10^{-4}$  Pa,  $2 \times 10^{-4}$  Pa and  $4 \times 10^{-4}$  Pa, respectively. The surface and internal structures of Yb/Al multilayers were characterized by X-ray grazing incident reflection, atomic force microscopy and wide-angle X-ray diffraction. The results show that the average interface width of Yb/Al multilayers decreases from 2.15 nm to 1.82 nm with the raise of base pressure from  $4 \times 10^{-4}$  Pa to  $4 \times 10^{-5}$  Pa; the surface roughness decreases from 1.87 nm to 1.43 nm.

基金项目: 国家自然科学基金(No. 12003016)

第一作者: 肖两省(1995—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为极紫外多层膜反射镜。Email: doyle52150@shu.edu.cn

导师(通讯作者): 辛子华(1963—), 女, 教授, 博士, 主要研究方向为凝聚态物理。Email: zhxin@shu.edu.cn

通讯作者: 齐润泽(1987—), 男, 博士后, 主要研究方向为 X 射线与极紫外光学。Email: qrz@tongji.edu.cn

收稿日期: 2021-04-14; 录用日期: 2021-06-07

<http://www.photon.ac.cn>

1.43 nm. Yb, Yb<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and Al polycrystalline grains are formed in the film, and the grain size increases slightly. The stress of SiC/(Yb/Al)<sub>3</sub> period multilayer is tensile, and the stress increases from 85 MPa to 142 MPa with the base pressure raising from  $4 \times 10^{-4}$  Pa to  $4 \times 10^{-5}$  Pa. The reflectivity of the sample prepared under  $4 \times 10^{-5}$  Pa base pressure was measured. When the wavelength is 73.6 nm and the incident angle is 5°, the reflectivity of the sample is 31.3%.

**Key words:** Ultraviolet radiation; Vacuum deposition; Multilayers; Reflection; Magnetron sputtering

**OCIS Codes:** 310.1620; 050.1970; 230.4170; 260.7200; 350.6090

## 0 引言

紫外波段太阳观测是空间太阳探测的重要内容,极紫外和真空紫外(15~400 nm)波段的太阳观测可实现光球、色球、过渡区和日冕四个层次的全覆盖,不仅对诊断太阳大气的辐射和磁流体力学过程、认知太阳活动起源与爆发机理、追踪太阳大气中物质和能量的传输、揭示日冕加热和太阳风加速机制等太阳物理前沿研究有重要的科学意义,还对监视灾害性空间天气事件的源头——耀斑、日冕物质抛射等剧烈的太阳爆发有重要的应用意义。国外已发射多颗极紫外太阳观测卫星,如:太阳和日球层探测器(Solar and Heliospheric Observatory, SOHO<sup>[1]</sup>)、日地关系天文台(Solar Terrestrial Relations Observatory, STEREO<sup>[2]</sup>)、太阳动力学天文台(Solar Dynamics Observatory, SDO<sup>[3]</sup>)和太阳轨道(Solar Orbiter<sup>[4]</sup>)等,并开展了相关研究。

多层膜反射镜是极紫外太阳观测系统的核心元件。在波长大于115 nm波段,ZUKIC M等使用MgF<sub>2</sub>和Al,或者MgF<sub>2</sub>和其他氟化物(如BaF<sub>2</sub>、LaF<sub>3</sub>和LiF)制备高反射多层膜<sup>[5-7]</sup>。在波长小于50 nm波段,有Sc/Si<sup>[8-10]</sup>或者Mg/SiC<sup>[11-12]</sup>等高反射多层膜。但在54~90 nm波段,由于材料的强烈吸收,难以制备高效率反射镜。镧系材料在54~90 nm波段具有相对较低的吸收,使得54~90 nm波段多层膜反射镜的制备成为可能。WINDT DL等研制了Si/Tb<sup>[13]</sup>、SiC/Tb<sup>[14]</sup>、Si/Gd<sup>[15]</sup>和Si/Nd<sup>[16]</sup>多层膜,其在55~69 nm波段的峰值反射率在12%到27%<sup>[17]</sup>之间。在镧系材料中,Yb在55~90 nm波段吸收系数较小,Yb/Al多层膜可以提升该波段的反射率。2009年,VIDAL-DASILVA M等<sup>[17]</sup>采用热蒸发方法制备了Yb/Al/Yb/SiO薄膜,实测80 nm和85 nm处的峰值反射率分别为27.6%和24.7%;在干燥柜中保存两年后,80 nm处的峰值反射率下降到约20%。加入SiO扩散阻挡层,制备的Al/SiO/Yb/SiO薄膜在91 nm处峰值反射率为19.1%;制备的Yb/SiO/Al/SiO/Yb/SiO薄膜在78 nm处的峰值反射率为18.3%,存放稳定性得到了提升。

Yb/Al均是活泼金属,成膜质量和性能受本底真空度的影响较大。为了研制工作在76 nm处的高反射率多层膜,确定较佳的制备实验参数,本文在不同本底真空度条件下,采用直流磁控溅射方法制备了Yb/Al系列多层膜样品。使用掠入射X射线反射、原子力显微镜、大角X射线衍射和极紫外反射率计表征了多层膜样品,研究了本底真空度对Yb/Al多层膜微结构和反射率的影响。

## 1 多层膜制备和测试

在制备76 nm处高反射率的Yb/Al周期多层膜时,为避免Yb和Al氧化,基于文献和制备经验,选择15 nm厚的SiC作为保护层。利用IMD软件<sup>[18]</sup>模拟计算不同周期膜对数 $N$ 、不同周期 $d$ 和不同膜厚比值 $\Gamma$ (Yb的膜层厚度与周期的比值)的多层膜反射率。确立76 nm处最优膜系结构为SiC/(Yb/Al)<sub>3</sub>/Sub-Si,  $d(\text{SiC})=15$  nm,膜对数 $N=3$ , Yb/Al周期 $d=64.30$  nm,  $d(\text{Yb})=18.65$  nm,  $d(\text{Al})=45.65$  nm,  $\Gamma=0.29$ 。模拟计算时使用的光学常数来自文献<sup>[19-22]</sup>。

采用国产超高真空直流磁控溅射设备,制备了设计的Yb/Al周期多层膜。制备用靶材Yb的纯度为99.99%、Al的纯度为99.999%和SiC的纯度为99.5%。溅射工作气体为Ar气,气体纯度为99.999%。基底分别为20 mm×20 mm的超光滑Si基片和直径为30 mm、厚度为1 mm的石英基片。镀制在石英基片上的样品用作应力测试,其他测试均在Si基片样品上完成。在本底真空度分别为 $4 \times 10^{-5}$  Pa、 $8 \times 10^{-5}$  Pa、 $1 \times 10^{-4}$  Pa、 $2 \times 10^{-4}$  Pa和 $4 \times 10^{-4}$  Pa时,制备了5组多层膜样品。在镀制过程中,通过计算机控制达到目标厚度<sup>[23-24]</sup>。

使用英国Bede公司D1高分辨率X射线衍射仪(Cu-K $\alpha$ 线)测试了样品的掠入射X射线反射率(Grazing Incidence X-ray Reflection, GIXRR),使用Bede Refs软件拟合了测试结果,获得膜层厚度和界面宽度。使

用原子力显微镜(Atomic Force Microscope, AFM)表征了薄膜的表面形貌。扫描区域像素为 $256 \times 256$ 个,扫描尺寸分别为 $1 \mu\text{m} \times 1 \mu\text{m}$ 、 $2 \mu\text{m} \times 2 \mu\text{m}$ 和 $5 \mu\text{m} \times 5 \mu\text{m}$ 。通过傅里叶分析<sup>[25]</sup>方法,计算了样品的表面功率谱密度(Power Spectral Density, PSD)函数。使用Bruker D8 X射线衍射仪(Cu-K $\alpha$ 线),测量了多层膜样品内薄膜的结晶状态,依据Scherrer公式<sup>[26]</sup>,计算了膜层内的平均晶粒尺寸。使用Zygo干涉仪( $\lambda=632.8 \text{ nm}$ )测量石英基片在镀膜前后的面形,根据Stoney公式<sup>[27]</sup>,计算了不同本底真空下制备的Yb/Al多层膜的应力。使用自研的极紫外-X射线反射率计测试多层膜样品在Ne I谱线(73.6 nm)处的反射率。

## 2 结果与讨论

图1为不同本底真空度条件下制备的Yb/Al多层膜的GIXRR测试和拟合曲线,拟合得到的Yb/Al多层膜的膜层厚度和界面宽度,如表1所示。由GIXRR的拟合结果可以得出:SiC保护层厚度约为15.05~15.27 nm,与设计值15 nm符合。Yb/Al多层膜周期和膜厚比的实际值约为 $d=63.34 \sim 63.78 \text{ nm}$ 和 $\Gamma=0.29$ ,与设计目标 $d=63.40 \text{ nm}$ 和 $\Gamma=0.29$ 相符。当本底真空度从 $4 \times 10^{-4} \text{ Pa}$ 提升至 $4 \times 10^{-5} \text{ Pa}$ 时,Yb/Al多层膜的平均界面宽度从2.15 nm减小到1.82 nm,如图2所示。当制备的本底真空度为 $4 \times 10^{-4} \text{ Pa}$ 时,较多的残余气体( $\text{O}_2$ 、 $\text{N}_2$ 和 $\text{H}_2\text{O}$ )参与到溅射镀膜过程,其与溅射靶材原子或沉积薄膜发生反应,使薄膜的内部结构和光学常数发生改变<sup>[28]</sup>。当制备的本底真空度为 $4 \times 10^{-5} \text{ Pa}$ 时,可以获得更好成膜质量的Yb/Al多层膜。这一现象也出现在类似的研究工作中<sup>[29-30]</sup>。

图3(a)~(e)为在不同本底真空度下制备的Yb/Al多层膜的扫描区域为 $2 \mu\text{m} \times 2 \mu\text{m}$ 的AFM测试结果。图3(f)为多层膜表面粗糙度均方根值随本底真空度的变化。当制备的本底真空从 $4 \times 10^{-4} \text{ Pa}$ 提升至 $4 \times 10^{-5} \text{ Pa}$ ,多层膜样品的表面颗粒状结构尺寸变小,粗糙度从1.87 nm减小到1.43 nm。表面粗糙度的逐步减小也表明膜层内部界面粗糙度也逐步减小,这与GIXRR的测试结果相符。从图4中不同真空度条件下制备的多层膜表面PSD曲线对比可知,在 $1 \sim 26 \mu\text{m}^{-1}$ 空间频率范围内,不同本底真空度制作的样品PSD曲线

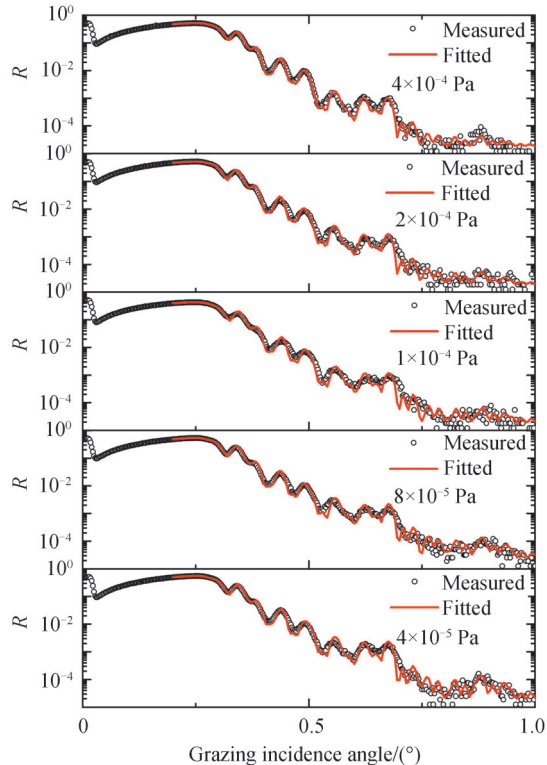


图1 不同本底真空度条件下制备的Yb/Al多层膜的GIXRR测试和反射率拟合曲线

Fig.1 GIXRR measured and fitting curves of Yb/Al multilayer prepared under different base pressure conditions

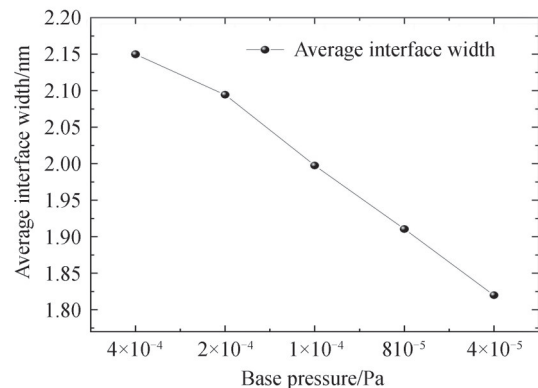


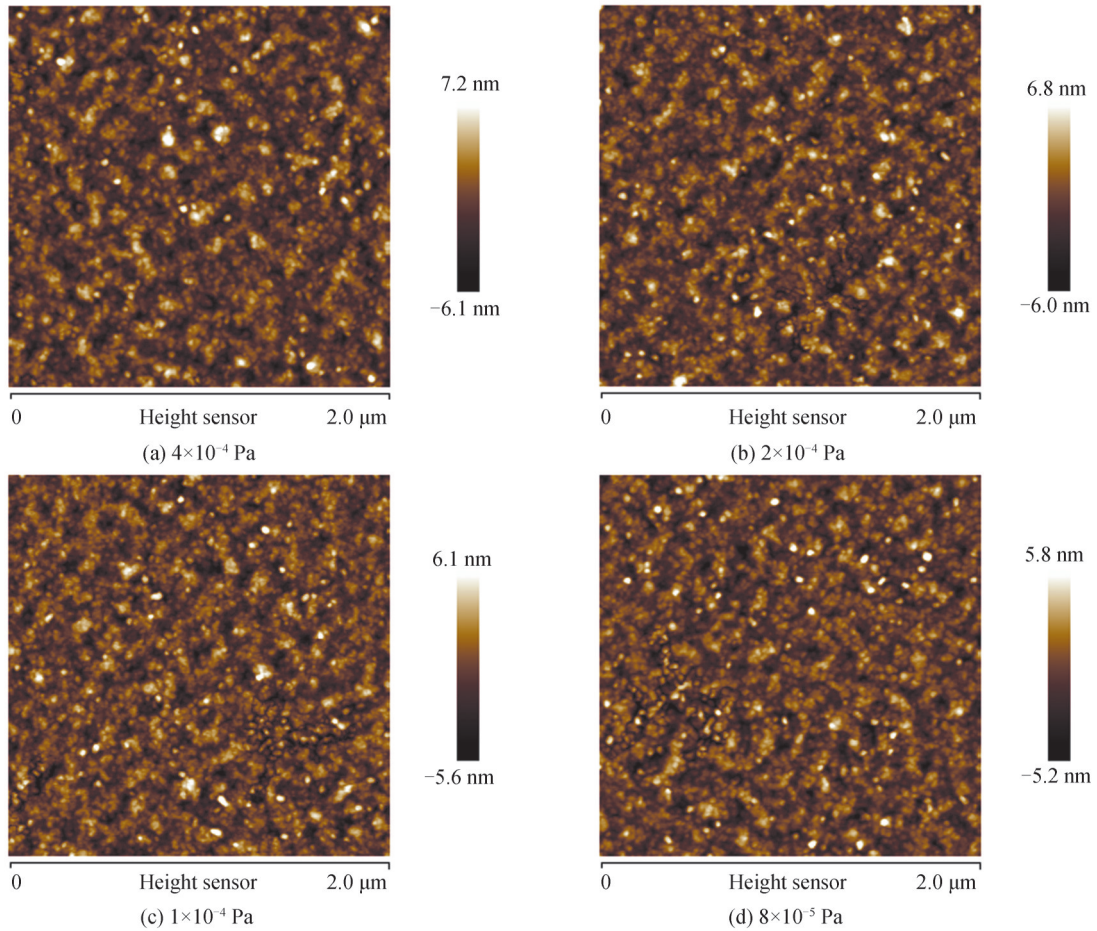
图2 不同本底真空度下Yb和Al间的平均界面宽度

Fig.2 Average interfacial widths of Yb and Al under different base pressure

表 1 不同本底真空度条件下制备的 Yb/Al 多层膜结构参数  
 Table 1 Structural parameters of Yb/Al multilayers prepared under different base pressure

Sample	Material	Thickness/nm	Interface width/nm
$4 \times 10^{-4}$ Pa	a-SiC*	15.05	1.70
	Yb	18.45	2.01
	Al	45.33	2.23
$2 \times 10^{-4}$ Pa	a-SiC	15.18	1.59
	Yb	18.20	1.96
	Al	45.31	2.23
$1 \times 10^{-4}$ Pa	a-SiC	15.07	1.46
	Yb	18.21	1.84
	Al	45.40	2.16
$8 \times 10^{-5}$ Pa	a-SiC	15.17	1.28
	Yb	18.13	1.75
	Al	45.20	2.07
$4 \times 10^{-5}$ Pa	a-SiC	15.27	1.46
	Yb	18.29	1.65
	Al	45.40	1.99

\*a-SiC 指非晶形态的 SiC





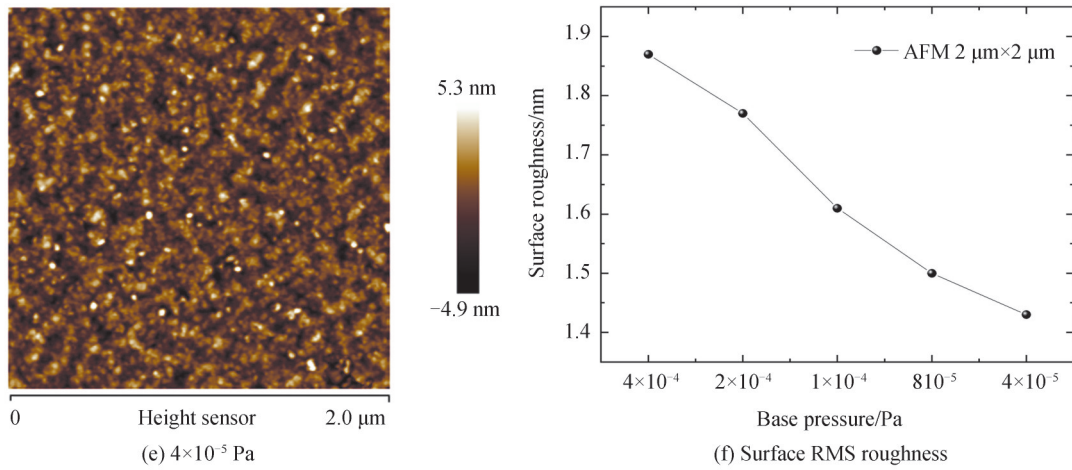


图3 不同真空度下制备的Yb/Al多层膜的AFM表面形貌图像及Yb/Al多层膜表面粗糙度均方根  
Fig. 3 AFM images of Yb/Al multilayer from  $2 \times 10^{-4}$  Pa to  $4 \times 10^{-5}$  Pa, and RMS roughness of Yb/Al multilayer surface

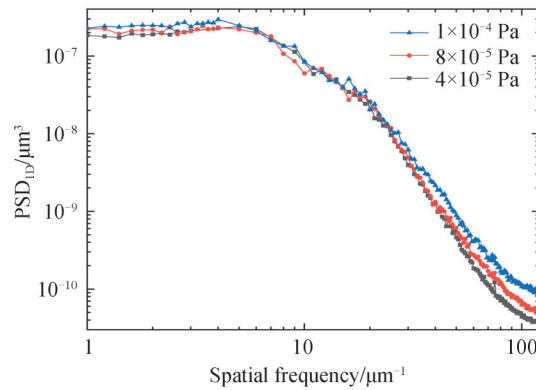


图4 Yb/Al多层膜的表面形貌的功率谱密度(PSD)曲线  
Fig. 4 PSD of Yb/Al multilayer surfaces

几乎没有变化,PSD曲线的差异主要在  $26 \sim 120 \mu\text{m}^{-1}$  空间频率范围内,说明多层膜制备的本底真空度影响多层膜高空间频率范围的表面形貌。

为进一步研究Yb/Al多层膜的内部微结构的变化,采用XRD测试了不同本底真空度下制备的Yb/Al多层膜样品衍射谱,结果如图5。XRD曲线在  $28.405^\circ$ 、 $29.763^\circ$ 、 $32.210^\circ$ 和  $38.897^\circ$ 出现衍射峰,这可能对应Yb(110)<sup>[31]</sup>、 $\text{Yb}_2\text{O}_3(222)$ 和  $\text{Yb}_2\text{O}_3(123)$ <sup>[32-34]</sup>及  $\text{Al}(111)$ <sup>[35]</sup>等晶面。其中  $\text{Al}(111)$ 的峰位稍向大角度偏移,可能是因为膜层中生成的  $\text{Al}_x\text{O}_y$ 和  $\text{Yb}_x\text{Al}_y$ 化合物使得  $\text{Al}(111)$ 的晶格间距发生了变化。测试结果中未出现  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 的

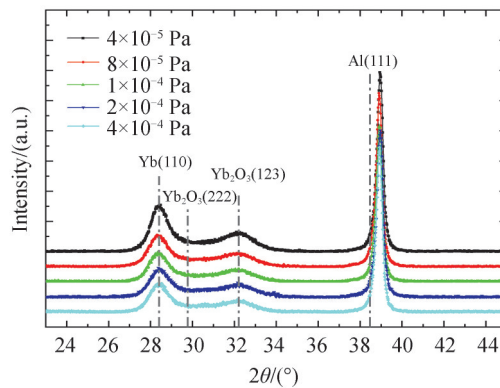


图5 不同本底真空度制备下的Yb/Al多层膜XRD衍射谱  
Fig. 5 XRD diffraction spectrum of Yb/Al multilayers prepared under different base pressures

衍射峰,可能是因为 $\text{Yb}_2\text{O}_3$ 的生成焓( $-1\ 815.73\ \text{kJ/mol}$ )较 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 的生成焓( $-1\ 657.97\ \text{kJ/mol}$ )低,膜层中的氧更多地与Yb结合,使得 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 的量较少导致。尽管过去报道Yb与Al在界面处会发生扩散,生成 $\text{Yb}_x\text{Al}_y$ 化合物,但在XRD的测试结果中未出现对应的衍射峰,这可能是因为磁控溅射制备的膜层致密,膜层间的相互扩散得到抑制, $\text{Yb}_x\text{Al}_y$ 化合物含量较少,没有形成可以被XRD探测到的结晶颗粒。不同本底真空度下制备的样品中Yb(110)峰对应相的晶粒大小约为 $7.14\sim 7.82\ \text{nm}$ ; $\text{Yb}_2\text{O}_3(222)$ 对应的晶粒大小约为 $4.83\sim 5.40\ \text{nm}$ ; $\text{Yb}_2\text{O}_3(123)$ 对应晶粒大小约为 $3.83\sim 3.99\ \text{nm}$ ;Al(111)相的晶粒大小约为 $8.73\sim 9.29\ \text{nm}$ 。当本底真空度从 $4\times 10^{-4}\ \text{Pa}$ 提升至 $4\times 10^{-5}\ \text{Pa}$ 时,Yb/Al多层膜中的Yb(110)、 $\text{Yb}_2\text{O}_3(222)$ 和 $\text{Yb}_2\text{O}_3(123)$ 及Al(111)的衍射峰强度均略有增大,这可能是因为随着本底真空度的提升,膜层内的杂质含量变少,使得纯的Yb和Al含量变多,结晶增强<sup>[36]</sup>;尽管O的总含量也有所减少,但没有了其他杂质的影响后, $\text{Yb}_2\text{O}_3$ 也变得更加容易结晶了。

Yb/Al多层膜应力随本底真空度变化的曲线如图6,多层膜为张应力,且随本底真空度的提升,Yb/Al多层膜的应力值从85 MPa增大到142 MPa,这可能与膜层内的平均晶粒尺寸的增大有关<sup>[37]</sup>。

使用自研的极紫外-X射线反射率计测试了多层膜样品在Ne I谱线(73.6 nm)处的反射率,结果如图7。当入射角为 $5^\circ$ 时,在 $4\times 10^{-5}\ \text{Pa}$ 下制备的Yb/Al多层膜的测量反射率为31.3%,其他本底真空度下制备的多层膜反射率也都在30.0%左右,略低于 $4\times 10^{-5}\ \text{Pa}$ 样品。基于表1中GIXRR拟合的膜系结构进行模拟计算,

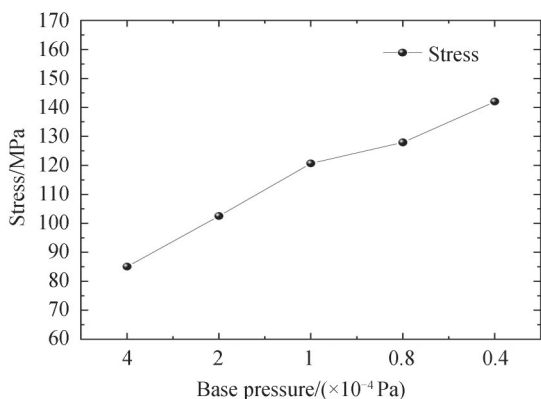


图6 Yb/Al多层膜的应力随本底真空度的变化

Fig. 6 The stress of Yb/Al multilayers as a function of the base pressure

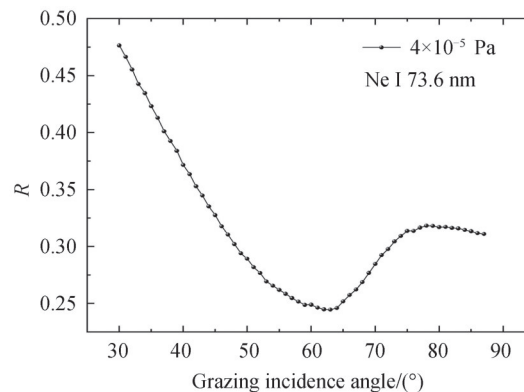


图7  $4\times 10^{-5}\ \text{Pa}$ 本底真空度下制备的Yb/Al多层膜反射率

Fig. 7 Reflectivity of Yb/Al multilayer under  $4\times 10^{-5}\ \text{Pa}$

在入射角为 $5^\circ$ 、入射波长为73.6 nm的条件下,在 $4\times 10^{-5}\ \text{Pa}$ 本底真空度条件下制备的Yb/Al多层膜,在未考虑界面宽度时,反射率为48.7%;考虑界面宽度带来的影响时,反射率为45.5%,界面宽度使反射率仅下降6.6%。测试表明,即使考虑膜层间的界面层,实际反射率仍远低于理论值。这主要是膜层的氧化所造成的<sup>[38]</sup>,图5的XRD结果也表明样品有氧化现象。已有研究发现Al膜等薄膜材料在极紫外波段的光学常数和反射率受制备中的真空条件影响较大<sup>[39]</sup>。因为没有该波段的Al和Yb氧化物的光学常数,所以无法在反射率拟合中具体考虑氧化带来的影响。本文制备多层膜样品的实测反射率和文献[17]中的反射率值相近。

### 3 结论

为满足太阳过渡区域O V谱线的观测需求,选择Yb/Al作为研究对象,采用直流磁控溅射的方法在硅基片和石英基片上制备了具有SiC保护层的Yb/Al周期多层膜。测试结果表明,当制作的真空度从 $4\times 10^{-4}\ \text{Pa}$ 提升至 $4\times 10^{-5}\ \text{Pa}$ 时,Yb/Al多层膜的平均界面宽度从2.15 nm减小到1.82 nm,表面粗糙度从1.87 nm减小到1.43 nm,膜层中的Yb(110)、 $\text{Yb}_2\text{O}_3(222)$ 和 $\text{Yb}_2\text{O}_3(123)$ 以及Al(111)的平均晶粒尺寸也略有增大,应力从85 MPa增大到142 MPa。在本底真空度为 $4\times 10^{-5}\ \text{Pa}$ 时制备的Yb/Al多层膜样品在入射角为 $5^\circ$ 、入射光波长73.6 nm时测得反射率为31.3%,与使用GIXRR拟合结果计算得到的45.5%反射率有较大差距。膜层的微结构与化学形态使得实际制备膜层的光学常数与理论不同<sup>[39-41]</sup>,这可能是实测反射率与计算反射率有较大差距的主要原因<sup>[42]</sup>。下一步工作中,将重点关注膜层内部微结构和化学形态对膜层光学常数

的影响并开展相关测试表征研究。

#### 参考文献

- [1] DOMINGO V, FLECK B, POLAND A I. SOHO: the solar and heliospheric observatory[J]. *Space Science Reviews*, 1995, 72(1-2): 81-84.
- [2] KAISER M L, KUCERA T A, DAVILA J M, et al. The STEREO mission: An introduction[J]. *Space Science Reviews*, 2008, 136(1): 5-16.
- [3] PESNELL W D, THOMPSON B J, CHAMBERLIN P C. The solar dynamics observatory (SDO)[M]. *The Solar Dynamics Observatory*. Springer, New York, NY, 2011: 3-15.
- [4] MARSCH E, MARSDEN R, HARRISON R, et al. Solar Orbiter-mission profile, main goals and present status[J]. *Advances in Space Research*, 2005, 36(8): 1360-1366.
- [5] ZUKIC M, TORR D G. Multiple reflectors as narrow-band and broadband vacuum ultraviolet filters[J]. *Applied Optics*, 1992, 31(10): 1588-1596.
- [6] ZUKIC M, TORR D G, KIM J, et al. Filters for the international solar terrestrial physics mission far-ultraviolet imager[J]. *Optical Engineering*, 1993, 32(12): 3069-3074.
- [7] GATTO A, THIELSCH R, HEBER J, et al. High-performance deep-ultraviolet optics for free-electron lasers[J]. *Applied Optics*, 2002, 41(16): 3236-3241.
- [8] USPENSKII Y A, LEVASHOV V E, VINOGRADOV A V, et al. High-reflectivity multilayer mirrors for a vacuum-ultraviolet interval of 35 - 50 nm[J]. *Optics Letters*, 1998, 23(10): 771-773.
- [9] YULIN S A, SCHAEFERS F, FEIGL T, et al. Enhanced reflectivity and stability of Sc/Si multilayers[C]. 2004, SPIE 5193: 155-163.
- [10] GAUTIER J, DELMOTTE F, BRIDOU F, et al. Characterization and optimization of magnetron sputtered Sc/Si Multilayers for Extreme Ultraviolet Optics[J]. *Applied Physics A*, 2007, 88(4): 719-725.
- [11] TAKENAKA H, ICHIMARU S, OHCHI T, et al. Soft-X-ray reflectivity and heat resistance of SiC/Mg multilayer[J]. *Journal of Electrospectroscopy and Related Phenomena*, 2005, 144: 1047-1049.
- [12] MARTÍNEZ-GALARCE D S, BOERNER P, SOUFLI R, et al. The high-resolution lightweight telescope for the EUV (HiLiTE)[C]. 2008, SPIE, 7011: 70113K.
- [13] WINDT D L, SEELY J F, KJORNATTANAWANICH B, et al. Terbium-based extreme ultraviolet multilayers[J]. *Optics Letters*, 2005, 30(23): 3186-3188.
- [14] KJORNATTANAWANICH B, WINDT D L, SEELY J F, et al. SiC/Tb and Si/Tb multilayer coatings for extreme ultraviolet solar imaging[J]. *Applied Optics*, 2006, 45(8): 1765-1772.
- [15] KJORNATTANAWANICH B, WINDT D L, SEELY J F. Normal-incidence silicon - gadolinium multilayers for imaging at 63 nm wavelength[J]. *Optics Letters*, 2008, 33(9): 965-967.
- [16] KJORNATTANAWANICH B, WINDT D L, USPENSKII Y A, et al. Optical constants determination of neodymium and gadolinium in the 3-to 100-nm wavelength range[C]. SPIE, 2006, 6317: 63170U.
- [17] VIDAL-DASILVA M, FERNÁNDEZ-PEREA M, MÉNDEZ J A, et al. Narrowband multilayer coatings for the extreme ultraviolet range of 50-92 nm[J]. *Optics Express*, 2009, 17(25): 22773-22784.
- [18] WINDT D L. IMD—Software for modeling the optical properties of multilayer films[J]. *Computers in Physics*, 1998, 12(4): 360-370.
- [19] RAKIĆ A D. Algorithm for the determination of intrinsic optical constants of metal films: application to aluminum[J]. *Applied Optics*, 1995, 34(22): 4755-4767.
- [20] LARRUQUERT J I, AZNÁREZ J A, MÉNDEZ J A, et al. Optical properties of ytterbium films in the far and the extreme ultraviolet[J]. *Applied Optics*, 2003, 42(22): 4566-4572.
- [21] FERNÁNDEZ-PEREA M, LARRUQUERT J I, AZNÁREZ J A, et al. Optical constants of Yb films in the 23-1700 eV range[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2007, 24(12): 3691-3699.
- [22] LARRUQUERT J I, PÉREZ-MARÍN A P, GARCÍA-CORTÉS S, et al. Self-consistent optical constants of SiC thin films[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2011, 28(11): 2340-2345.
- [23] WANG Zhanshan. Effect of film thickness errors on performance of soft X-ray multilayer[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2003, 11(2):136-138.  
王占山. 膜厚控制误差对软X射线多层膜性能影响的分析[J]. *光学精密工程*, 2003, 11(2):136-138.
- [24] WANG Fengli, WANG Zhanshan, ZHANG Zhong, et al. Study on W/B4C, W/C, W/Si multilayers [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2005, 13(1):28-33.  
王凤丽, 王占山, 张众, 等. W/B4C、W/C、W/Si多层膜的研究[J]. *光学精密工程*, 2005, 13(1):28-33.
- [25] ULMEANU M, SERGHEI A, MIHAILESCU I N, et al. C-Ni amorphous multilayers studied by atomic force microscopy[J]. *Applied Surface Science*, 2000, 165(2-3): 109-115.
- [26] SHAW L L, GOBERMAN D, REN R, et al. The dependency of microstructure and properties of nanostructured

- coatings on plasma spray conditions[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2000, 130(1): 1-8.
- [27] MITTERER C, HOLLER F, ÜSTEL F, et al. Application of hard coatings in aluminum die casting—soldering, erosion and thermal fatigue behavior[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2000, 125(1-3): 233-239.
- [28] DONG Maojin, CHEN Tao, WANG Jizhou, et al. Effect of vacuum degree on optical and structural properties of TiO<sub>2</sub> thin films [J]. *Vacuum and Low Temperature*, 2010, 16(4):233-237.  
董茂进, 陈焘, 王济洲, 等. 真空度对 TiO<sub>2</sub> 薄膜光学和结构特性的影响[J]. *真空与低温*, 2010, 16(4):233-237.
- [29] WEN M, MA S, HUANG Q, et al. Effect of background pressure on Co/C multilayers[J]. *Applied Optics*, 2017, 56(4): C16-C20.
- [30] XU D, HUANG Q, WEN M, et al. Structure, thermal stability and extreme ultraviolet performance of Mo/Y multilayers [J]. *Thin Solid Films*, 2015, 592: 266-270.
- [31] PEYMANI-MOTLAGH S M, SOBHANI-NASAB A, ROSTAMI M, et al. Assessing the magnetic, cytotoxic and photocatalytic influence of incorporating Yb 3+ or Pr 3+ ions in cobalt - nickel ferrite [J]. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 2019, 30(7): 6902-6909.
- [32] PERMIN D A, NOVIKOVA A V, KOSHKIN V A, et al. Fabrication and magneto-optical properties of Yb<sub>2</sub>O<sub>3</sub> based ceramics[J]. *Magnetochemistry*, 2020, 6(4): 63.
- [33] KAHRAMAN A, KARACALI H, YILMAZ E. Impact and origin of the oxide-interface traps in Al/Yb<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/n-Si/Al on the electrical characteristics[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2020, 825: 154171.
- [34] HAO L, HE G, FANG Z, et al. Modulation of the microstructure, optical and electrical properties of sputtering-driven Yb<sub>2</sub>O<sub>3</sub> gate dielectrics by sputtering power and annealing treatment[J]. *Applied Surface Science*, 2020, 508: 145273.
- [35] ZHONG Q, LI W, ZHANG Z, et al. Optical and structural performance of the Al (1% wtSi)/Zr reflection multilayers in the 17 - 19nm region[J]. *Optics Express*, 2012, 20(10): 10692-10700.
- [36] LIU Y, HUANG Q, QI R, et al. Improvement of the Microstructure and X-ray Performance of Ultrathin Ru/C Multilayer Mirror after High Temperature Treatment[J]. *Coatings*, 2021, 11(1): 45.
- [37] WU Yonggang, CAO Erhua, WANG Zhanshan, et al. Preparation and characterization of free-standing molybdenum filter for X-ray laser[J]. *Optical Instruments*, 2001, 23(5-6): 144-148.  
吴永刚, 曹二华, 王占山, 等. X射线激光自支撑 Mo 滤光膜的制备及特性研究[J]. *光学仪器*, 2001, 23(5-6): 144-148.
- [38] ZHU J, JI B, JIANG H, et al. Spectral purity Al/Yb/Al filter for vacuum ultraviolet at 50 to 100 nm [J]. *Optical Engineering*, 2020, 59(5): 055108.
- [39] HALFORD J H, CHIN F K, NORMAN J E. Effects of vacuum deposition conditions on ellipsometric parameters, optical constants, and reflectance of ultrapure aluminum films[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1973, 63(7): 786-792.
- [40] GAROLI D, FRASSETTO F, MONACO G, et al. Reflectance measurements and optical constants in the extreme ultraviolet-vacuum ultraviolet regions for SiC with a different C/Si ratio[J]. *Applied Optics*, 2006, 45(22): 5642-5650.
- [41] LARRUQUERT J I, KESKI-KUHA R A M. Reflectance measurements and optical constants in the extreme ultraviolet for thin films of ion-beam-deposited SiC, Mo, Mg<sub>2</sub>Si, and InSb and of evaporated Cr[J]. *Applied Optics*, 2000, 39(16): 2772-2781.
- [42] BRIDOU F, CUNOT-PONSARD M, DESVIGNES J M, et al. Experimental determination of optical constants of MgF<sub>2</sub> and AlF<sub>3</sub> thin films in the vacuum ultra-violet wavelength region (60 - 124 nm), and its application to optical designs[J]. *Optics Communications*, 2010, 283(7): 1351-1358.