

月球表面环境对 Mo/Si 多层膜光学特性的影响

刘 震¹ 高劲松¹ 陈 波² 王彤彤¹ 王笑夷¹ 申振峰¹ 陈 红¹

(¹ 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所光学系统先进制造技术重点实验室, 吉林 长春 130033)
² 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所空间光学研究一部, 吉林 长春 130033)

摘要 研究了月球表面高温、强辐射的空间环境下 Mo/Si 多层膜的热稳定性和辐照稳定性。Mo/Si 多层膜采用磁溅射法镀制, 将制备好的多层膜在 100 °C 和 200 °C 高温下加热, 利用激光等离子体反射率计和 X 射线衍射仪 (XRD) 对加热前后的多层膜进行了测量。结果显示在 200 °C 以内, 多层膜反射率和中心波长没有显著变化, 表现出良好的热稳定性。利用 Monte Carlo 方法模拟了质子在多层膜内造成的缺陷的分布和浓度分布。模拟显示, 能量大的质子沉积在多层膜内部, 造成的缺陷也集中在多层膜内部。用能量为 60 keV, 剂量分别为 $3 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ 和 $3 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ 的质子对 Mo/Si 多层膜进行辐照实验。发现多层膜内部出现了烧蚀损伤缺陷及节瘤缺陷。结果表明能量相同时, 辐照剂量越大对多层膜反射率影响越大。

关键词 薄膜; 多层膜; 热稳定性; 辐照稳定性; 反射率; 等离子体层

中图分类号 O484.41 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201232.0931001

Influence of Lunar Surface Environment on the Optical Characteristic of the Mo/Si Multilayer

Liu Zhen¹ Gao Jinsong¹ Chen Bo² Wang Tongtong¹

Wang Xiaoyi¹ Shen Zhenfeng¹ Chen Hong¹

(¹ Key Laboratory of Optical System Advanced Manufacturing Technology, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China)
² Space Optical Research Department One, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China)

Abstract The thermal stability and irradiation stability of the Mo/Si multilayer in the high temperature and strong radiation environment of the lunar surface are analyzed. The Mo/Si multilayers are measured by hard X-ray diffractometer (XRD) and laser plasma reflectometer (LPR) before and after heating (in a vacuum chamber) at 100 °C and 200 °C. The results show that there is almost no change in the reflectivity and central wavelength of the Mo/Si multilayer. The distribution of the defects and its density in the Mo/Si multilayer is simulated by Monte Carlo method. It shows that the protons and the defects concentrate in the inner of the multilayer with higher energy protons. The Mo/Si multilayers are irradiated by protons with the energy of 60 keV and the dose $3 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ and $3 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ respectively. The erosion defects and nodule defects are observed in the multilayer after irradiation by protons. The results show that the influence on the Mo/Si multilayers is proportional to the dose of the protons with the same energy.

Key words thin films; multilayer; thermal stability; irradiation stability; reflectivity; plasmasphere

OCIS codes 230.4170; 120.6810; 020.2070; 120.5700; 350.1260

1 引 言

地球等离子层位于内磁层最接近地球的区域,

是内磁层各种耦合相互作用的核心区域。等离子体层的结构形式、辐射特性等对近地空间环境有重要

收稿日期: 2012-03-14; 收到修改稿日期: 2012-04-11

基金项目: 国家自然科学基金(10878008, 40774098)资助课题。

作者简介: 刘 震(1980—), 男, 博士后, 主要从事光学薄膜理论及制备工艺等方面的研究。

E-mail: liuzhencl@163.com

的影响^[1]。等离子体层中最主要的离子为 H^+ ，约占 85%。居第二位的是 He^+ ，约占 5%~10%。等离子体层中还存在着 O^+ ， O^+ 与 H^+ ，密度比率在 1%~10% 之间^[2~4]。等离子体层中离子的一个显著特性是共振散射太阳光中的极紫外(EUV)辐射，其散射强度与散射点离子密度成正比^[5~7]。等离子体层辐射的 He^+ 30.4 nm 为孤立线谱，由于其辐射强度高、辐射机制简单，容易从获得的光学图像反演出等离子体层的分布，因而成为等离子体层极紫外观测的最佳选择。磁层对这条谱线是光学稀薄的^[8]，因此 Johnson 等^[9] 提出了用光学方法来观测等离子体层和磁层。

国际上对地球等离子体层的观测始于 20 世纪 70 年代。1972 年美国发射的 STP-2 卫星观测到地球等离子体层的 30.4 nm 辐射，获得了其辐射强度分布。1998 年，日本发射一颗火星轨道器“Planet-B”，其上搭载一台 X 射线-紫外扫描仪(XUV Scanner)，卫星进入火星轨道之前对地球等离子体层侧面进行了成像观测^[10~12]。2000 年 NASA 发射了 IMAGE 卫星，其上搭载了一台极紫外成像仪(EUV Imager)，轨道为极轨大椭圆轨道，在远地点对等离子体层极紫外辐射进行整体扫描。2008 年日本发射了 SELENE 卫星，用于研究极紫外辐射投影在子午面上的整体特性^[13]。

为了获得高质量的地球等离子体层辐射图像，陈波等^[1] 研究了地球等离子体层的辐射特性，模拟了在月球表面观测地球等离子体层极紫外辐射的分布。设计了一台极紫外相机用于在月球表面观测地球等离子体层。相机由多层膜球面反射镜、Al/C 薄膜吸收滤光片和球面微通道板(MCP)光子计数探测器组成。工作波段为 30.4 nm，光谱带宽小于 5 nm，视场角为 15° ，角分辨率为 0.1° ，曝光时间大于 10 min，灵敏度大于 $0.1 \text{ cps} \cdot R^{-1} \text{ bin}^{-1}$ ^[2]。

月球表面没有大气的保温和热传导，白昼温度高达 $130^\circ\text{C} \sim 150^\circ\text{C}$ ，夜晚则会降到 $-160^\circ\text{C} \sim -180^\circ\text{C}$ 。由于没有大气层保护，辐射可直接到达其表面，分别为太阳风、太阳宇宙射线和银河宇宙射线。

1) 太阳风主要成分是质子和电子，质子能量为 $0.3 \sim 3 \text{ keV}$ ，电子能量为 $1 \sim 100 \text{ eV}$ ，两者数量基本相等，占 95% 以上，重粒子主要为 He 核，占 4.8%。

2) 太阳宇宙射线的主要成分是质子占 99%， α 粒子占 1%，能量为 $10 \sim 100 \text{ MeV}$ 。太阳宇宙射线随太阳爆发现象而发生，受太阳活动影响。

3) 银河宇宙射线最主要的是质子，第二位是 α

粒子。能量为 $10 \sim 10^{12} \text{ MeV}$ ^[14]。

极紫外多层膜反射镜是 EUV 相机光学系统的重要元件，反射镜的质量直接决定了 EUV 相机的成像质量。国际上还未在月球上对地球等离子体层进行观测。因此，研究月球表面环境对多层膜反射镜光学特性的影响意义重大。月球表面太阳宇宙射线受到太阳活动的调制，选择合适的发射时机可以最大程度减小其对反射镜的影响。银河宇宙射线通量非常小，一般为 $2 \sim 4.5 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ，可能引起单粒子事件的发生。太阳风则会时刻从日冕吹向月球表面。鉴于月球环境的特殊性，要求 Mo/Si 多层膜在 200°C 高温及强辐射辐照(千电子伏特量级)下光学性能稳定。本文针对月球表面环境特点，研究了高温及太阳风对 Mo/Si 多层膜光学特性的影响。

2 多层膜热稳定性实验

本文的 Mo/Si 多层膜采用磁控溅射法制备。磁控溅射法镀膜由于具有粒子动能大、薄膜聚集度高等优点被广泛应用于高性能薄膜的制备。加热设备为高真空高温 Mo 加热炉，该设备极限真空可达 $1.0 \times 10^{-5} \text{ Pa}$ ，温度最高可加至 750°C ，温度误差为 $\pm 5^\circ\text{C}$ 。将制备好的 Mo/Si 多层膜放入加热炉中，然后抽真空、加热，实验参数如表 1 所示。

表 1 Mo/Si 多层膜高温实验参数

Table 1 Parameters of high-temperature test for Mo/Si multilayer

Temperature / $^\circ\text{C}$	Time /h	Vacuum /(10^{-4} Pa)
100	24	1
200	1	1
200	4	1

加热之后的多层膜反射镜用 X 射线衍射仪(XRD)进行了测量。周期性的多层膜可以看做是人造晶体，当 X 射线入射到晶体，符合布拉格方程($2d \sin \theta = m\lambda$)的条件时，发生衍射。图 1(a)，(b)分别为 Mo/Si 多层膜加热前后小角衍射曲线和大角衍射曲线。

薄膜的扩散是热激活的过程，且只有材料从加热过程中获得的能量大于激活能时，扩散才会发生。高温环境下会加速物质的扩散过程，膜层间材料的扩散会导致界面结构的改变。多层膜反射镜的光学性能，如反射率、中心波长等依赖于多层膜界面的结构，由于扩散导致的界面变宽及界面粗糙度的增大会使多层膜反射镜的中心波长漂移、反射率下降^[15,16]。从图 1 可以推断出多层膜微观结构没有

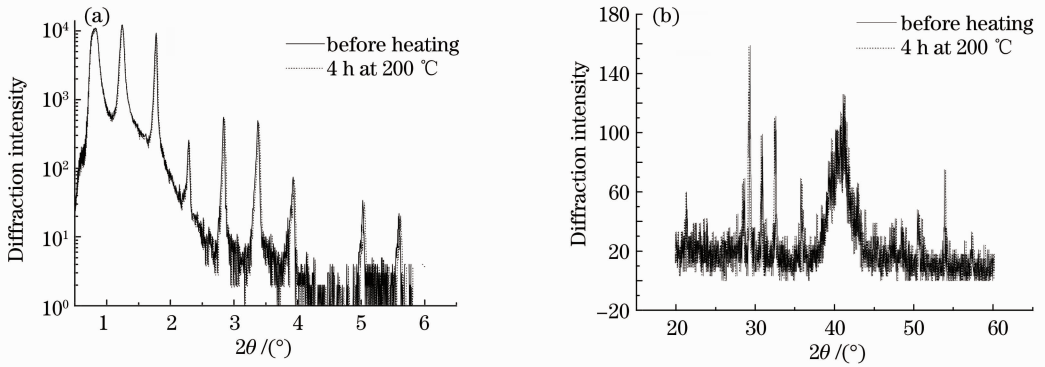


图 1 Mo/Si 多层膜加热(a)前和(b)后 XRD 衍射曲线

Fig. 1 XRD diffraction curves of Mo/Si multilayer (a) before and (b) after heating

显著变化,因此不会对反射率曲线造成巨大影响。为了验证推测,用激光等离子体反射率计测量了 Mo/Si 多层膜的反射率曲线,测量结果如图 2 所示。

从图 2 可以看出,加热前后 Mo/Si 多层膜的反射率、中心波长和带宽几乎没有变化。两种测量结果得到了相互验证。

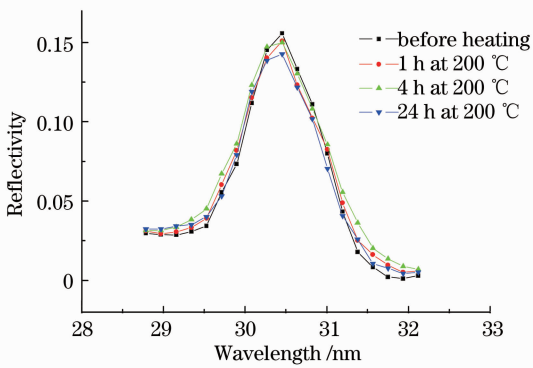


图 2 Mo/Si 多层膜加热前后反射率曲线

Fig. 2 Reflectance curves of Mo/Si multilayer before and after heating

3 多层膜辐照稳定性实验

月球表面没有大气层的保护,高能粒子可以直接到达月球,对反射镜造成影响。粒子与物质相互作用是非常复杂的物理化学过程,与吸收剂量、粒子能量、粒子种类以及被辐照材料种类有关。用 Monte Carlo 方法随机选择碰撞参数,模拟碰撞过程,计算一个粒子从进入材料开始到最终丧失能量停止或穿出材料时所产生的辐照缺陷。因此,计算出入射粒子能量损失的分布,就可以得到辐照损伤的分布。

采用 Kinchin-Pease 模型^[17],用 TRIM 软件模拟计算了质子在多层膜中的运输情况,计算跟踪质

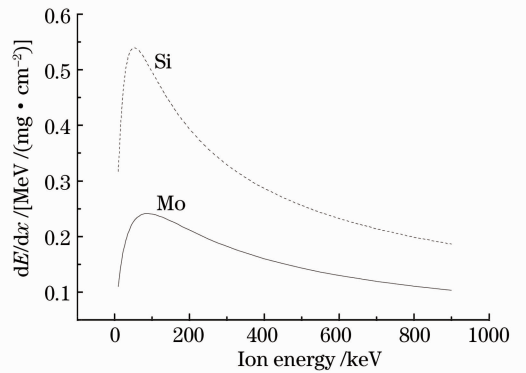


图 3 质子在 Si、Mo 材料中的阻止本领

Fig. 3 Proton stopping power in Si and Mo materials 子数为 99999。图 3 为质子在 Si、Mo 材料中的阻止本领。

图 4 和图 5 显示了能量为 10 keV 和 60 keV 辐照 Mo/Si 多层膜后,质子在多层膜内的沉积分布以及碰撞造成的缺陷在多层膜中的分布。

从图 4 和图 5 可以看出,入射质子能量越大,穿透能力越强,主要沉积在多层膜的深层部分,造成的缺陷主要集中在多层膜的内部;而质子能量低,穿透能力差,主要沉积在多层膜的外层,造成的缺陷主要集中在多层膜的外部。如果质子能量继续增大,质子会穿透整个多层膜,沉积在膜中的很少,此时造成的缺陷主要集中在基底上,对多层膜的影响较小。因此能量低的质子对多层膜的表面影响大。将入射质子剂量与图 4(a)和图 5(a)中纵坐标相乘,就可以得到质子浓度。由此可知相同能量的质子,辐照剂量越大,在多层膜内部造成的缺陷浓度越大。

辐照实验在综合模拟设备上进行,如图 6 所示。整个系统由真空室、质子加速器、散热系统和单极射频质谱仪组成。设备发出的质子束能量为 30~160 keV,真空度可达 10^{-5} Pa。

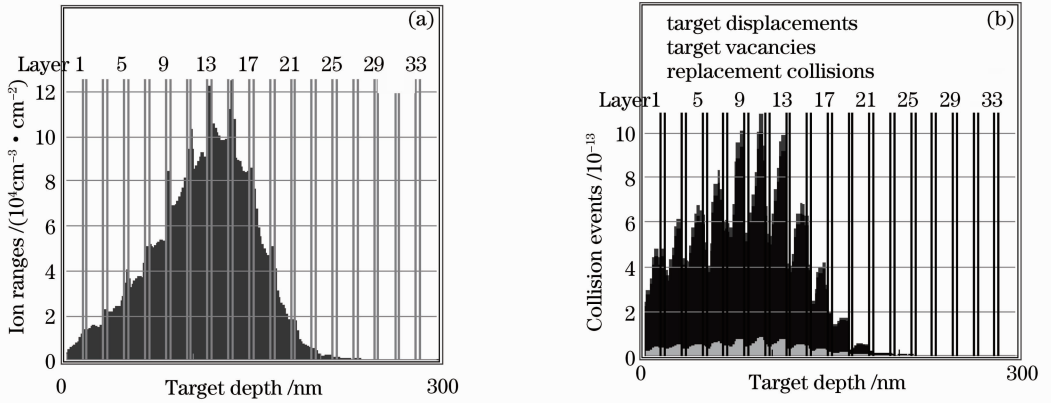


图 4 Mo/Si 多层膜经 10 keV 的质子辐照后膜层内质子(a)浓度分布和(b)缺陷分布
Fig. 4 Distribution of (a) proton density and (b) defects in Mo/Si multilayer after radiated by protons with energy of 10 keV

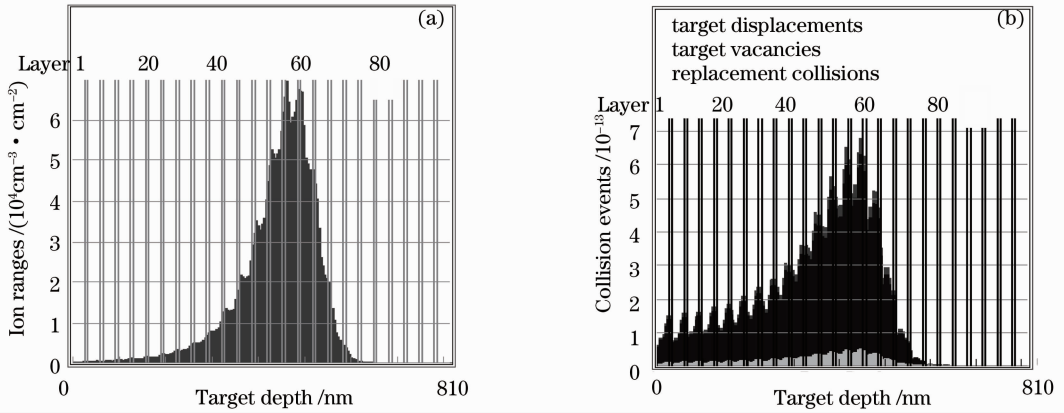


图 5 Mo/Si 多层膜经 60 keV 的质子辐照后膜层内质子(a)浓度分布和(b)缺陷分布
Fig. 5 Distribution of (a) proton density and (b) defects in Mo/Si multilayer after radiated by protons with energy of 60 keV

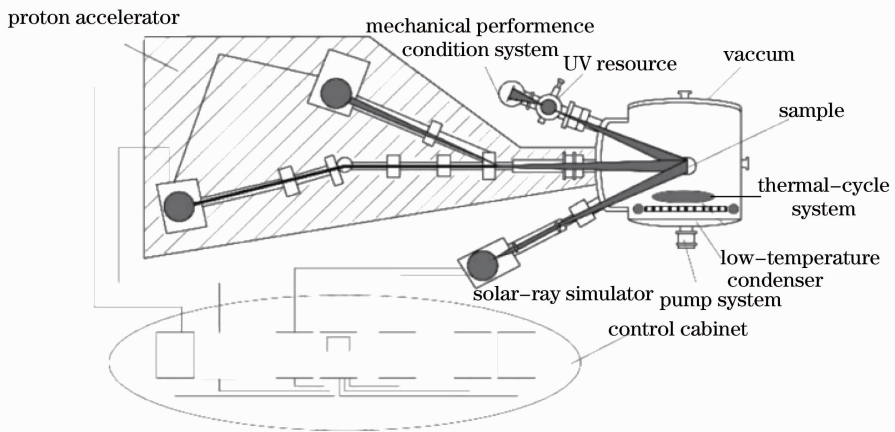


图 6 空间环境综合模拟器示意图
Fig. 6 Sketch of space environment synthesis simulator

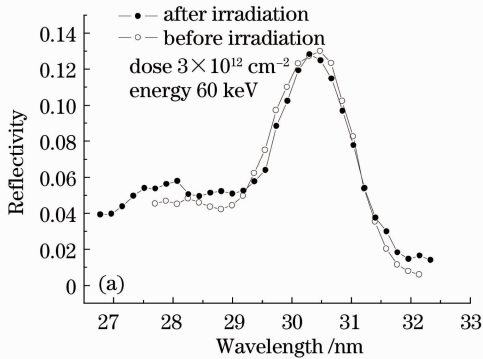
针对月球表面的太阳风对 Mo/Si 多层膜进行了模拟实验。月球表面太阳风中质子能量为千电子伏特量级,年通量可达 $5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ [19]。实验时,选取质子能量为 60 keV;为了比较不同剂量对 Mo/Si

多层膜光学特性的影响,选择了 $3 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ 和 $3 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ 两种剂量,分别相当于月球环境太阳风质子辐照约 5 h 和 500 h;质子束垂直入射到样片,真空度保持为 10^{-5} Pa ,真空室内样片温度保持在

(298 ± 2)K。

图 7 为 Mo/Si 多层膜经过剂量为 $3 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ ，能量为 60 keV 的质子照射后极紫外正入射反射率曲线(a), XRD 小角衍射曲线(b)。

从图 7 中可以看到, Mo/Si 多层膜的反射率在辐照前后没有明显变化, 中心波长也没有明显的漂移, 所以, 可以认为多层膜微观结构没有因质子辐照而产生显著变化。从 XRD 小角衍射曲线可以看



到, 衍射曲线峰值位置, 衍射带宽也几乎没有变化, 也可以佐证多层膜微观结构没有显著变化的观点。

图 8 为 Mo/Si 多层膜经过剂量为 $3 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ ，能量为 60 keV 的质子照射后极紫外正入射反射率曲线(a), XRD 衍射曲线(b)。从上图可以看出经过剂量为 $3 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ ，能量为 60 keV 的质子照射后 Mo/Si 多层膜反射率下降了 3.8%，带宽减小了 0.4 nm，中心波长向短波方向漂移 0.1 nm。

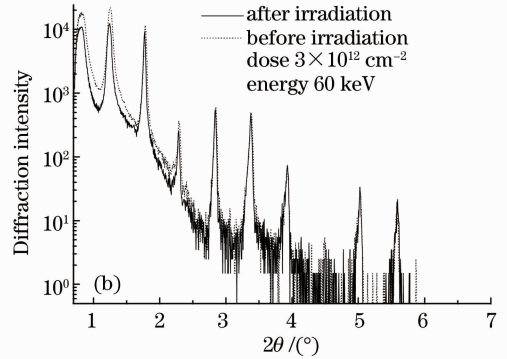


图 7 Mo/Si 多层膜辐照前后射(a)反射率和(b) XRD 衍射测量曲线

Fig. 7 (a) Reflectivity and (b) XRD diffraction curves of Mo/Si multilayer before and after irradiation

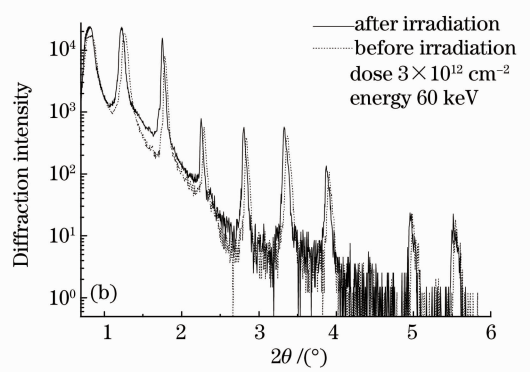
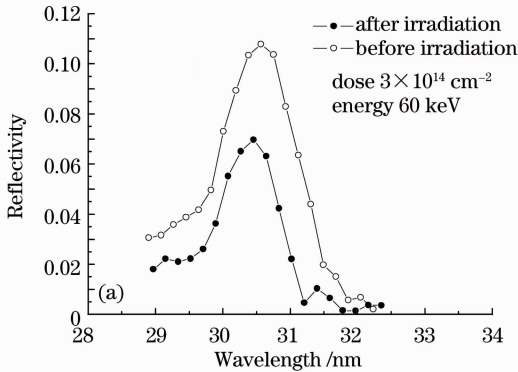


图 8 Mo/Si 多层膜辐照前后(a)反射率和(b)XRD 衍射测量曲线

Fig. 8 (a) Reflectivity and (b) XRD diffraction curves of Mo/Si multilayer before and after irradiation

XRD 小角衍射曲线在辐照后发生了变化, 衍射峰值与辐照前相比有所降低, 且衍射峰值位置也发生漂移, 说明 Mo/Si 多层膜微观结构受到质子辐照影响, 发生了变化。为了能够直观地观察多层膜微观结构发生的变化, 利用透射电镜对其进行检测, 多层膜中出现了明显的缺陷, 图 9 和图 10 圈出了多层膜的缺陷。

导致 Mo/Si 多层膜反射率下降的原因主要有以下几个方面:

1) 由于辐照效应使得多层膜产生的缺陷导致膜层界面间结构发生改变, 部分区域周期性的结构已经消失, 有些已经变得模糊不清, 从而造成相长干涉减弱, 导致反射率下降;

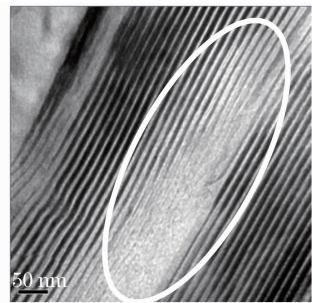


图 9 质子辐照后 Mo/Si 多层膜中的烧蚀损伤缺陷

Fig. 9 Ablation defects in Mo/Si multilayer after irradiation

2) 经过辐照后在多层膜内产生的大量缺陷, 造成膜层界面粗糙度的增加, 导致反射率下降;

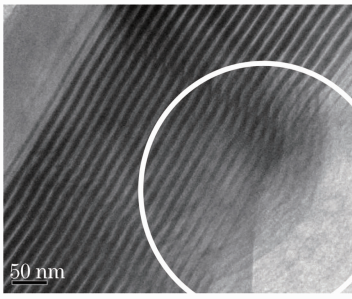


图 10 质子辐照后 Mo/Si 多层膜中的节瘤缺陷

Fig. 10 Nodule defects in Mo/Si multilayer after irradiation

3) 辐照产生的缺陷在多层膜中的积累导致材料的额外吸收使反射率下降,吸收的剂量可表示为^[20]

$$D = 1.6 \times 10^8 \frac{E\phi}{R\rho}, \quad (1)$$

式中 D 为吸收剂量, E 为粒子能量, ϕ 为质子辐照剂量, R 为粒子在材料中的行程, ρ 为材料密度。

从(1)式可以看出,当入射粒子能量相同时,吸收剂量 D 与粒子辐照剂量成正比。辐照剂量越大,在膜层内部产生的缺陷也就越多,所以材料吸收剂量也越大。

4 结 论

本文研究了月球表面高温、强辐射的空间环境下 Mo/Si EUV 多层膜热稳定性、辐照稳定性。Mo/Si 多层膜在 200 °C 高温以内,光学特性没有明显变化。相机在月球表面工作温度都会控制在 100 °C 以内,因此,Mo/Si 的热稳定性完全可以胜任科研任务。对辐照前后多层膜光学性能进行检测,用 Monte Carlo 模拟质子及其造成的缺陷在多层膜内的浓度分布,分析了辐照对多层膜光学性能的影响。结果显示,入射粒子能量越大,穿透能力越强,造成的缺陷主要集中在多层膜内部;粒子能量低,穿透能力差,造成的缺陷主要集中在多层膜的外部。相同能量下,剂量越大对 Mo/Si 多层膜反射率影响越大。因此应当选择合适的观测时间和角度,尽量减小辐照对反射镜的影响,延长工作寿命。

参 考 文 献

- 1 Chen Bo, He Fei. Optical design of moon-based earth's plasmaspheric extreme ultraviolet imager[J]. *Optics & Precision Engineering*, 2011, **19**(9): 2057~2062
陈波,何飞. 月基地球等离子体层极紫外成像仪的光学设计[J]. *光学精密工程*, 2011, **19**(9): 2057~2062
- 2 C. J. Farrugia, J. Geiss, D. T. Young *et al.*. GEOS-1 observations of low-energy ions in the Earth's plasmasphere: a study on composition, and temperature and density structure under quiet geomagnetic conditions [J]. *Adv. Space Res.*, 1988, **8**(8): 25~33

- 3 C. J. Farrugia, D. T. Young, J. Geiss *et al.*. The composition, and temperature and density structure of cold ions in the quiet terrestrial plasmasphere: GEOS-1 results [J]. *J. Geophys. Res.*, 1989, **94**(A9): 11865~11891
- 4 R. H. Comfort, I. T. Newberry, C. R. Chappell. Preliminary statistical survey of plasmaspheric ion properties from observations by DE 1/RIMS [C]. Washington; Proceeding of the First Huntsville Workshop on Magnetosphere/Ionosphere Plasma Models, 1988. 107~114
- 5 J. A. Ratcliffe. Physics of the Upper Atmosphere [M]. New York; Academic Press, 1960. 202~206
- 6 J. C. Brandt. Interplanetary gas, VI, on diffuse extreme ultraviolet helium radiation in the night and day sky [J]. *Astrophys. J.*, 1961, **134**(2): 975~980
- 7 R. R. Meier. Ultraviolet spectroscopy and remote sensing of the upper atmosphere [J]. *Space Sci. Rev.*, 1991, **58**(1-2): 1~185
- 8 B. R. Sandel, A. L. Broadfoot, C. C. Curtis *et al.*. The extreme ultraviolet imager investigation for the image mission [J]. *Space Sci. Rev.*, 2000, **91**(1-2): 197~242
- 9 C. Y. Johnson, J. M. Young, J. C. Holmes. Magnetoglow—a new geophysical resource [J]. *Science*, 1971, **171**(3969): 379~381
- 10 M. Nakamura, K. Yamashita, I. Yoshikawa *et al.*. Helium observation in the Martian ionosphere by an X-ray ultraviolet scanner on Mars orbiter NOZOMI [J]. *Earth Planets Space*, 1999, **51**(1): 61~70
- 11 T. Yamamoto, K. Tsuruda. The planet-B mission [J]. *Earth Planets Space*, 1998, **50**(3): 175~181
- 12 M. Nakamura, I. Yoshikawa, A. Yamazaki *et al.*. Terrestrial plasmaspheric imaging by an extreme ultraviolet scanner on planet-B [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 2000, **27**(2): 141~144
- 13 M. Kato, S. Sasaki, K. Tanaka *et al.*. The Japanese lunar mission SELENE: science goals and present status [J]. *Adv. Space Res.*, 2008, **42**(2): 294~300
- 14 Ouyang Ziyuan. Introduction to Lunar Science [M]. Beijing: China Astronautic Publishing House, 2005. 9, 24~30
欧阳自远. 月球科学概论 [M]. 北京: 中国宇航出版社, 2005. 9, 24~30
- 15 Roberts S. Rosen, Daniel G. Stearns, Michael A. Viliardos *et al.*. Silicide layer growth rates in Mo/Si multilayers [J]. *Appl. Opt.*, 1993, **32**(34): 6975~6980
- 16 Karen Holloway, Khiem Ba Do, Robert Sinclair. Interface reactions on annealing molybdenum-silicon multilayers [J]. *Appl. Phys.*, 1989, **65**(2): 474~480
- 17 J. P. Biersack, L. G. Haggmark. A Monte Carlo computer program for the transport of energetic ions in amorphous targets [J]. *Nuclear Instruments and Methods*, 1980, **174**(1-2): 257~269
- 18 Fan Xianhong, Li Min, Ni Qiliang *et al.*. Change of reflectivity of Mo/Si multilayer irradiated by proton [J]. *Acta Physica Sinica*, 2008, **57**(10): 6494~6499
范鲜红,李敏,倪启良等. Mo/Si 多层膜在质子辐照下反射率的变化 [J]. *物理学报*, 2008, **57**(10): 6494~6499
- 19 He Fei, Chen Bo, Zhang Xiaoxin. Moon-based imaging of earth plasmaspheric extreme ultraviolet radiation [J]. *Optics & Precision Engineering*, 2010, **18**(12): 2564~2573
何飞,陈波,张效信. 月基观测地球等离子体层极紫外辐射特性 [J]. *光学精密工程*, 2010, **18**(12): 2564~2573
- 20 A. D. Pogrebnjak, A. D. Mikhaliyov, N. A. Pogrebnjak *et al.*. Evolution of vacancy defects and dislocations in surface layers of iron as a result of pulsed electron beam treatment [J]. *Phys. Lett. A*, 1998, **241**(6): 357~363

栏目编辑: 韩峰