

# Mo/Si 多层膜在质子辐照下反射率的变化<sup>\*</sup>

范鲜红<sup>1,2)</sup> 李 敏<sup>1,2)</sup> 尼启良<sup>1)</sup> 刘世界<sup>1)</sup> 王晓光<sup>1)</sup> 陈 波<sup>1)</sup>

1) 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, 长春 130033)

2) 中国科学院研究生院, 北京 100049)

(2007 年 11 月 13 日收到, 2008 年 3 月 31 日收到修改稿)

为了检验应用在极紫外波段空间太阳望远镜上 Mo/Si 多层膜反射镜在空间辐射环境下反射率的变化情况, 模拟了部分空间太阳望远镜运行轨道的辐射环境, 利用不同能量和剂量的质子对 Mo/Si 多层膜反射镜进行辐照实验. 辐照前后反射率测量结果显示, 由于带电粒子的辐照损伤, 质子辐照会使 Mo/Si 多层膜反射镜的反射率降低, 且质子能量越低、剂量越大, 对多层膜的反射率影响越明显. 当质子能量  $E = 160$  keV, 剂量  $\phi = 6 \times 10^{11}/\text{mm}^2$  时, 反射率降低 4.1%; 能量  $E = 100$  keV, 剂量  $\phi = 6 \times 10^{11}/\text{mm}^2$  时, 反射率降低 5.7%; 能量  $E = 50$  keV, 剂量  $\phi = 8 \times 10^{12}/\text{mm}^2$  时, 反射率降低 10.4%. 用原子力显微镜测量辐照后 Mo/Si 多层膜反射镜的表面粗糙度比辐照前明显增加, 致使散射光线能量逐渐增大并最终导致反射率的降低.

关键词: 质子辐照, Mo/Si 多层膜反射镜, 辐照损伤

PACC: 6180

## 1. 引 言

很多光学系统在空间飞行一段时间后, 成像质量会有所降低, 其中最为重要的原因之一就是载能束流辐照使光学器件性能退化. Mo/Si 多层膜反射镜是空间太阳望远镜的关键元件之一, 其性能好坏影响空间太阳望远镜的成像质量<sup>[1-4]</sup>.

空间太阳望远镜预计的轨道高度为 730 km, 处在低地球轨道内, 在低地球轨道条件下主要是遭受质子束的直接辐照. 在很长一个时期内, 人们曾集中精力去研究能量为 1 MeV 左右的空间粒子辐照效应. 但是在对地静止轨道中绝大多数质子的能量是低于 1 MeV 的, 甚至低于 150 keV, 如图 1 所示<sup>[5]</sup>. 能量小于 200 keV 的质子和其他带电粒子在材料中射程小, 对光学元件或材料有特殊的表面效应, 对长寿命光学系统的影响不可忽略<sup>[6,7]</sup>. 所以, 研究能量低于 200 keV 的质子辐照对材料性能等方面产生的影响是非常重要的.

本文工作中, 用空间环境模拟装置产生质子束对自行设计的 3 块中心波长为 13.9 nm 的 Mo/Si 多

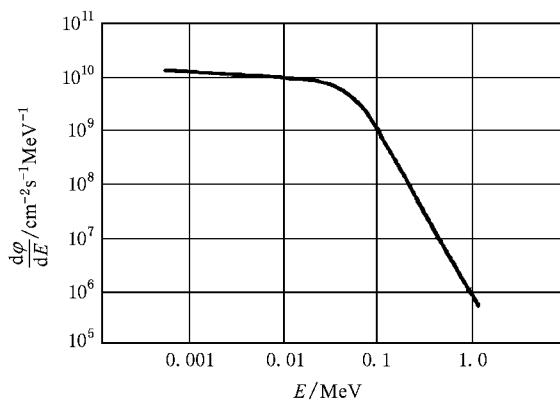


图 1 在对地静止轨道内的质子光谱

层膜反射镜样品进行辐照. 为了比较不同能量和剂量的质子对 Mo/Si 多层膜反射镜反射率的影响, 选择质子的通量为  $1.25 \times 10^{10} \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ , 对 3 块样品的辐照能量和剂量分别如下: 样品 A,  $E = 160$  keV,  $\phi = 6 \times 10^{11}/\text{mm}^2$ ; 样品 B,  $E = 100$  keV,  $\phi = 6 \times 10^{11}/\text{mm}^2$ ; 样品 C,  $E = 50$  keV,  $\phi = 8 \times 10^{12}/\text{mm}^2$ . 然后用原子力显微镜测量辐照前后 3 块样品的表面粗糙度, 最后测量辐照前后多层膜的反射率并分析了反射率降低的原因.

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金(批准号: 60677043, 40774098)资助的课题.

<sup>†</sup> 通讯联系人. E-mail: bochen2000@yahoo.com.cn

## 2. 实验方法及布局

为了模拟空间辐照环境,在哈尔滨工业大学空间环境实验室的综合模拟装置上进行了质子辐照实

验.此模拟系统由真空室、质子加速器、一个 77 K 的散热系统和连接到真空室的质谱仪组成,如图 2 所示.从这个装置出来的质子束的能量范围是 30—160 keV.

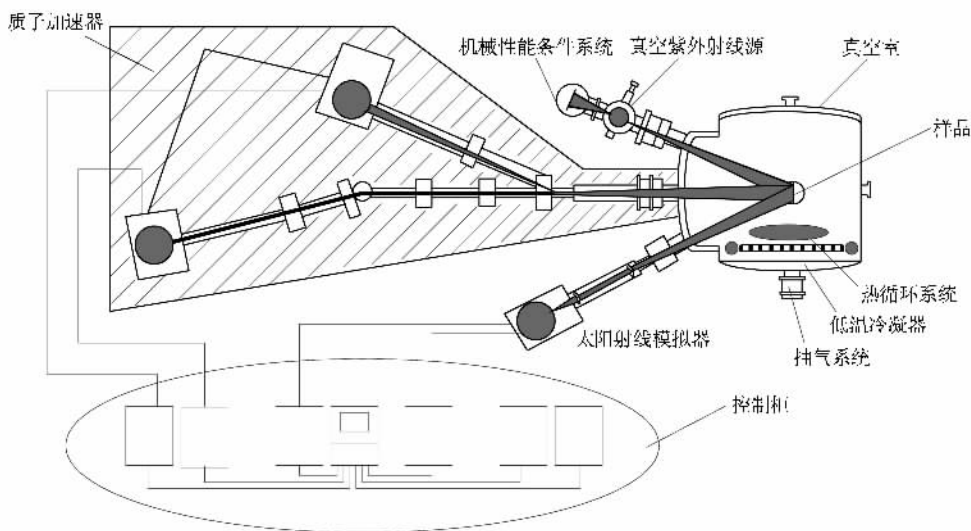


图 2 空间环境的综合模拟系统示意图

辐照前后反射率的测量采用由激光打靶产生的等离子体光源、高分辨率的 McPHERSON247 型掠入射软 X 射线-真空紫外单色仪、样品室和数据采集程序等构成的测量系统,实验装置如图 3 所示。

## 3. 实验结果与分析

测量得到辐照前后 3 块 Mo/Si 多层膜反射镜样品的反射率如图 4 所示.当质子辐照剂量均为  $\phi = 6 \times 10^{11} \text{ mm}^{-2}$  时,Mo/Si 多层膜经能量为 160 keV 的质子辐照后,反射率降低了 4.1%;经能量为 100 keV 的质子辐照后,反射率降低了 5.7%.这说明质子能量越低,反射率降低越多.当能量为 50 keV,剂量增加为  $\phi = 8 \times 10^{12} / \text{mm}^2$  时,反射率下降了 10.4%.

从以上的实验数据可以发现,Mo/Si 多层膜经质子辐照后其反射率下降.图 5 是应用 Monte-Carlo 方法计算的经能量分别为 50, 100 和 160 keV 的质子辐照后 Mo/Si 多层膜内的质子沉积分布比较.计算跟踪的质子数为 100000,计算使用的程序是 TRIM 软件包<sup>[8]</sup>.辐照损伤的 TRIM 程序主要是采用 Monte-Carlo 方法随机选定碰撞参数,模拟碰撞过程,计算一个粒子从进入靶材料开始到最终丧失能量停止或穿出时所产生的辐照缺陷.只要计算出射粒子能量损失的分布,就可以得到辐照损伤的分布.从微观看,由激发、电离或核运动引起的能量损失是一个不连续的过程,但从宏观看,粒子进入晶体中的能量损失是个连续的过程.假定电子能量损失和核能量损失之间没有关联,因而可以独立地处理,能量

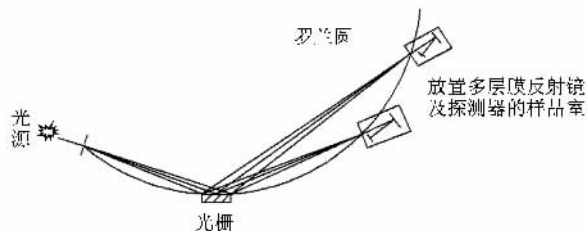


图 3 测量系统示意图

我们使用 McPHERSON247 掠入射软 X 射线-真空紫外单色仪,配 600 lp/mm 光栅,入缝、光栅、出缝都在罗兰圆上.出缝在罗兰圆上运动,进行波长扫描,当出射狭缝和入射狭缝在法线同一侧时得到负的光谱级,而当两个狭缝在法线的异侧时,得到正的光谱级.光栅曲率半径为 2.217 m,刻划面积为 30 mm × 50 mm,闪耀角为 2.07°,入射角为 88°,光谱分辨率为 0.075 nm,波长范围 0—125 nm,出射狭缝与探测器共同沿罗兰圆作扫描运动,扫描间隔为 0.05 nm,出射狭缝定位精度为 0.0254 mm.

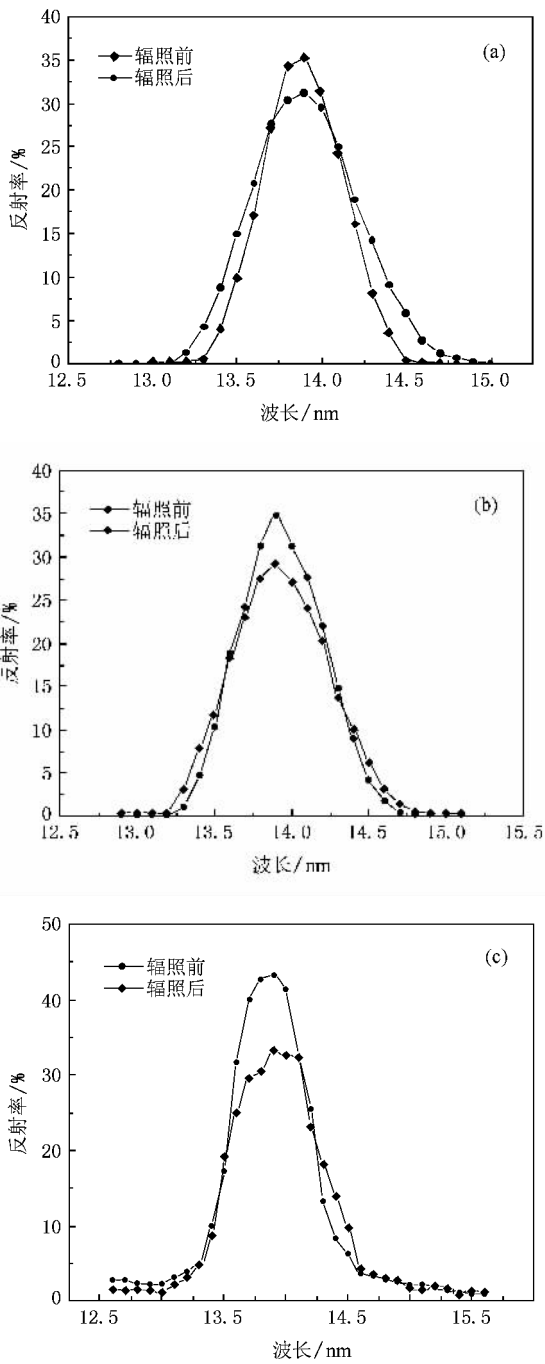


图 4 质子辐照前后反射率比较 (a) 样品 A,  $E = 160 \text{ keV}$ ,  $\phi = 6 \times 10^{11} / \text{mm}^2$ ; (b) 样品 B,  $E = 100 \text{ keV}$ ,  $\phi = 6 \times 10^{11} / \text{mm}^2$ ; (c) 样品 C,  $E = 50 \text{ keV}$ ,  $\phi = 8 \times 10^{12} / \text{mm}^2$

损失过程的特征可用单位长度上的能量损失  $-dE/dx$  来描述,  $-dE/dx$  又称为阻止本领.

设  $N$  为靶内原子数密度,  $d\sigma(E, T)$  是能量为  $E$  的入射粒子将  $T - T + dT$  范围的能量传递给靶原子的碰撞截面. 前进一段路径  $dx$  时发生这种碰撞次数为  $N d\sigma(E, T) dx$ , 入射粒子在路径  $dx$  上损失的

能量  $dE$  为  $-dE = N \int T d\sigma(E, T) dx$ , 即

$$-\frac{dE}{dx} = N \int T d\sigma(E, T) = NS, \quad (1)$$

式中  $\int T d\sigma(E, T)$  为阻止截面. 阻止本领可分为核阻止本领  $-(dE/dx)_n$  和电子阻止本领  $-(dE/dx)_e$ , 所以有

$$-\frac{dE}{dx} = \left(-\frac{dE}{dx}\right)_n + \left(-\frac{dE}{dx}\right)_e. \quad (2)$$

随着入射粒子在靶材料中的减速, 电子阻止的比例逐渐减少, 核阻止的比例逐渐增加.

考虑到计算效率和计算精度问题, 利用 Kinchin-Pease 模型<sup>[9]</sup> 对实验中所使用的 Mo/Si 多层膜进行模拟. 膜层周期为  $7.14 \text{ nm}$ , 共 60 个周期, 所以其厚度共  $428.4 \text{ nm}$ , 其中 Si 的厚度是  $257.04 \text{ nm}$ , Mo 的厚度是  $1713.6 \text{ nm}$ . 由图 5 可以发现辐照能量越低质子的射程越短, 在多层膜材料中沉积的浓度也越大, 对表面膜层的损伤更为显著. 能量为  $50 \text{ keV}$  的质子在 Mo/Si 多层膜中的沉积在多层膜的某一深度处, 这主要是由于质子与多层膜中的 Si 原子和 Mo 原子在碰撞过程中, 随着入射质子在材料中的深入其能量不断下降, 大部分入射质子最后沉积在多层膜相应的射程深度处, 导致被辐照的 Mo/Si 多层膜表面的吸收剂量很大. 而能量为  $100$  和  $160 \text{ keV}$  的质子在材料中沉积的非常少, 质子射程较远, 远远超出了反射镜膜层范围, 损伤主要集中于熔石英基底内, 对表面膜层产生的影响小一些.

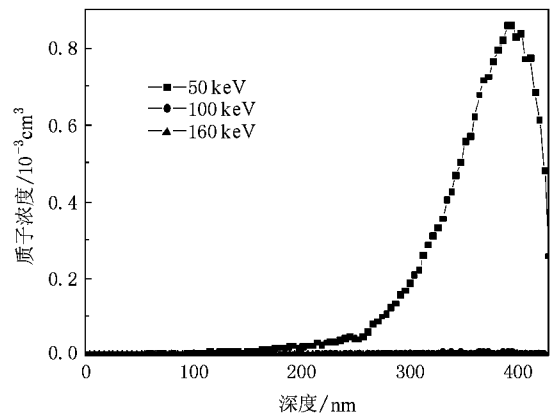


图 5 经能量分别为  $50$ ,  $100$  和  $160 \text{ keV}$  的质子辐照后 Mo/Si 多层膜内的质子浓度分布情况

为研究薄膜表面的形貌, 使用 NanoScope III 原

子力显微镜(AFM)直接测量质子辐照前和辐照后 Mo/Si 多层膜反射镜的表面粗糙度,结果如图 6 和图 7 所示.在沿  $x, y$  方向扫描范围是  $5 \mu\text{m} \times 5 \mu\text{m}$ ,分辨率是  $256 \times 256$  个数据点.在垂直表面的  $z$  方向用

灰度表示高度,扫描频率为 1 Hz.对每块多层膜样品在不同区域进行重复扫描 10 个点以上,扫描结果基本一致.应用 AFM 的软件对扫描图像进行处理,可以得到表面粗糙度.

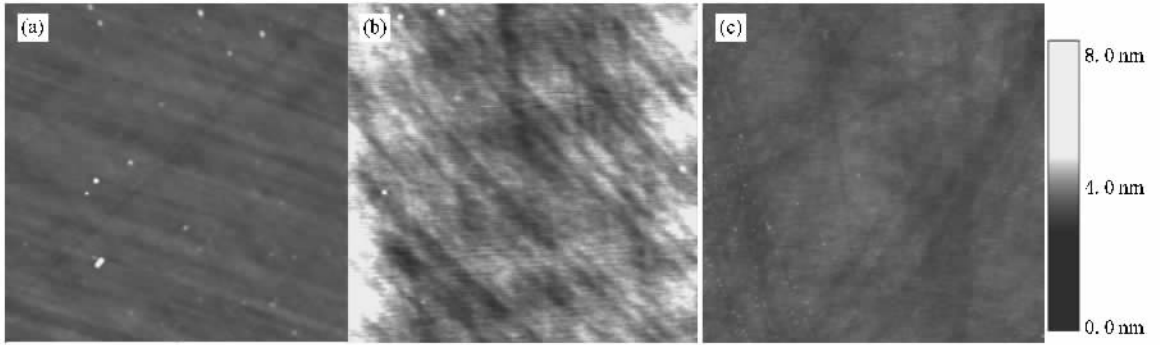


图 6 辐照前 3 个样品的表面粗糙度 (a) 0.398 nm (b) 0.540 nm (c) 0.401 nm

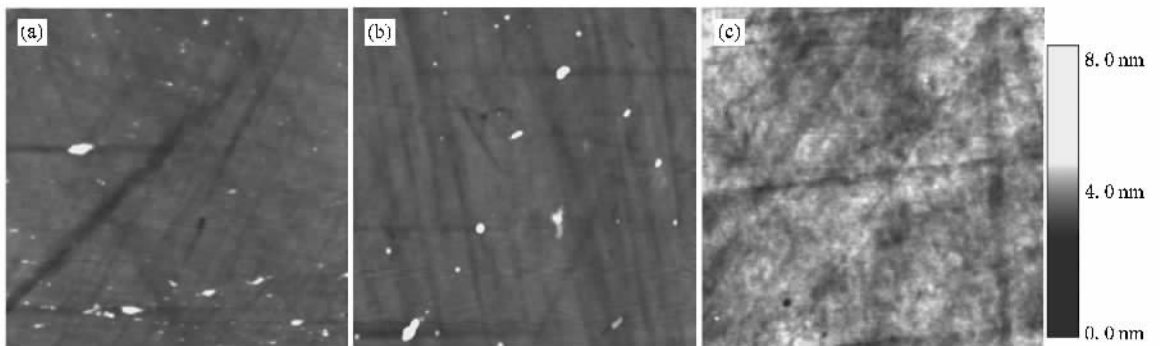


图 7 辐照后 3 个样品的表面粗糙度 (a) 0.691 nm, (b) 0.932 nm, (c) 0.502 nm

由图 6 和图 7 可见,辐照前样品 A、样品 B 和样品 C 的表面粗糙度值分别为 0.398、0.540 和 0.401 nm,辐照后分别为 0.691、0.932 和 0.502 nm.辐照后的 Mo/Si 多层膜反射镜的表面粗糙度比辐照前明显增加,致使散射光线能量逐渐增大而最终导致反射率的降低.

作为一种简化处理,只考虑多层膜表面和界面粗糙度的影响,多层膜的反射率可由下列 Debye-Waller 公式加以描述:

$$R = R_i \exp[-(4\pi\sigma \sin\theta/\lambda)^2], \quad (3)$$

其中  $R_i$  为理想光滑界面的多层膜反射率,  $\sigma$  为层膜界面的均方根粗糙度,  $\theta$  为软 X 射线的入射角,  $\lambda$  为入射光的波长.

由(3)式可知,表面粗糙度  $\sigma$  越大,多层膜的反射率越低.

另一方面因为辐照缺陷在 Mo/Si 多层膜中积累

导致了额外的吸收使反射率降低,该过程取决于吸收剂量,吸收剂量  $D$  和辐照剂量  $\phi$  可用下式换算<sup>[10]</sup>:

$$D = 1.6 \times 10^8 E \phi (\rho R). \quad (4)$$

式中材料吸收剂量  $D$  的单位为 rad,粒子能量  $E$  的单位为 MeV,质子辐照剂量  $\phi$  的单位为  $\text{cm}^{-2}$ ,粒子在材料中的射程  $R$  的单位为 cm,材料密度  $\rho$  的单位为  $\text{g}/\text{cm}^3$ .

质子的能量  $E$  越低,穿过样品材料的本领就越差,能量损失越严重,射程就越短,由(4)式可知,沉积在样品中的质子产生的杂质和缺陷就多,所以剂量都是  $\phi = 6 \times 10^{11}/\text{mm}^2$  时,辐照能量为 100 keV 的质子束比能量为 160 keV 的质子束对 Mo/Si 多层膜反射镜的破坏作用明显,所以样品 B 比样品 A 的反射率下降更多.

由(4)式还可以得到,质子能量越低,辐照剂量

$\phi$  越大,材料对质子的吸收就越多,在样品内部积累的缺陷就越多,从而对被辐照样品的破坏越严重.所以当质子能量为 50 keV,辐照剂量增加到  $\phi = 8 \times 10^{12} / \text{mm}^2$  时,样品 C 的反射率降低了 10.4%,比样品 A 和样品 B 的反射率降低更多.

#### 4. 结 论

本文主要研究了 Mo/Si 多层膜反射镜样品经不同能量和剂量的质子辐照后反射率的变化.实验测量数据和理论模拟计算结果都表明质子辐照能够使

Mo/Si 多层膜反射镜的性能退化,质子辐照能够在材料中诱发缺陷产生,质子能量越低,辐照剂量越大反射镜的破坏越明显.所以,暴露于低能量质子环境中光学元件性能退化是一个重要的问题,对于设计长寿命的空间太阳望远镜,是一个必须要考虑的因素.本文的研究将会对这方面的工作有重要参考价值.

哈尔滨工业大学空间材料与环境工程实验室的何世禹和刘海为本文工作提供实验条件完成质子辐照实验;中国科学院长春光学精密机械与物理研究所马月英提供 Mo/Si 多层膜反射镜样品,江苏大学关庆丰指导分析了实验结果.

- 
- [ 1 ] Gussenhoven M S , Mullon E G 1993 *IEEE Trans . Nucl Sci .* **40** 221
- [ 2 ] Pippin G 2003 *Progress in Organic Coatings* **47** 424
- [ 3 ] Lauriente M , Vampola A L , Koga R , Hosken R 1999 *J. Spacecraft Rockets* **36** 902
- [ 4 ] Kan H K A 1985 *SPIE* **541** 164
- [ 5 ] Garrett H B , Hastings D 1994 *AIAA* **0590** 1
- [ 6 ] Wei Q , Liu H , He S Y , Hao X P , Wei L 2006 *Acta Phys . Sin .* **55** 5525 ( in Chinese ) [ 魏 强、刘 海、何世禹、郝小鹏、魏龙 2006 物理学报 **55** 5525 ]
- [ 7 ] Peng K C , Sahu S K , Huang H C , Ueno K , Chang Y H , Wang C H , Hou W S 1997 *Nucl . Instr . Meth . Phys . Res . A* **384** 544
- [ 8 ] Ziegler J F , Biersack J P , Littmark U 1985 *The Stopping and Range of Ions in Solids* ( New York : Yorktown ) p166
- [ 9 ] Biersack J P , Haggmark L G 1980 *Nucl . Instr . Meth .* **174** 257
- [ 10 ] Liu H , He S Y , Wei Q , Yang D Z 2002 *Acta Photon . Sin .* **23** 366 ( in Chinese ) [ 刘 海、何世禹、魏 强、杨德庄 2002 光子学报 **23** 366 ]

# Change of reflectivity of Mo/Si multilayer irradiated by proton \*

Fan Xian-Hong<sup>1,2)</sup> Li Min<sup>1,2)</sup> Ni Qi-Liang<sup>1)</sup> Liu Shi-Jie<sup>1)</sup> Wang Xiao-Guang<sup>1)</sup> Chen Bo<sup>1)†</sup>

<sup>1</sup> *State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,*

*Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China* )

<sup>2</sup> *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China* )

( Received 13 November 2007 ; revised manuscript received 31 March 2008 )

## Abstract

In this paper, we simulated part of the low-Earth orbit's space radiation environment to investigate its influence on the reflectivity change of Mo/Si multilayer mirror used in the space solar telescope. The reflectivity was investigated before and after irradiation with proton of different energies and fluences. The results show that the reflectivity decreases when irradiated by proton because of the radiation-induced damage in the multilayer mirror, and it drops more when the energy of the proton decreases while their fluence increases. When the energy of proton  $E = 160$  keV with fluence  $\phi = 6 \times 10^{11}/\text{mm}^2$ ,  $E = 100$  keV with fluence  $\phi = 6 \times 10^{11}/\text{mm}^2$  and  $E = 50$  keV with fluence  $\phi = 8 \times 10^{12}/\text{mm}^2$ , the reflectivity drops about 4.1%, 5.7% and 10.4%, respectively. The roughness measured by atomic force microscopy increases after irradiation, which results in more scattering of incident ray so that the reflectivity of multilayer is reduced.

**Keywords** : proton irradiation, Mo/Si multilayer mirror, radiation damage

**PACC** : 6180

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China ( Grant Nos. 60677043, 40774098 ).

† Corresponding author. E-mail : bochen2000@yahoo.com.cn