

文章编号: 0253-2239(2007)04-0735-4

30.4 nm 波长 SiC/Mg 多层膜反射镜*

朱京涛¹ 张淑敏¹ 王 蓓¹ 吴文娟¹ 李存霞¹ 徐 垚¹ 张 众¹ 王凤丽¹
王占山¹ 陈玲燕¹ 周洪军² 霍同林²

(¹ 同济大学物理系精密光学工程与技术研究所, 上海 200092)
(² 中国科技大学国家同步辐射实验室, 合肥 230029)

摘要: 波长 30.4 nm 的 He- II 谱线是极紫外天文观测中最重要的谱线之一, 空间极紫外太阳观测光学系统需要采用多层膜作为反射元件。为此研究了 SiC/Mg、B₄C/Mg、C/Mg、C/Al、Mo/Si、B₄C/Si、SiC/Si、C/Si、Sc/Si 等材料组合的多层膜在该波长处的反射性能。基于反射率最大与多层膜带宽最小的设计优化原则, 选取了 SiC/Mg 作为膜系材料。采用直流磁控溅射技术制备了 SiC/Mg 多层膜, 用 X 射线衍射仪测量了多层膜的周期厚度, 用国家同步辐射计量站的反射率计测量了多层膜的反射率, 在入射角 12° 时, 实测 30.4 nm 处的反射率为 38.0%。

关键词: 薄膜光学; 极紫外; 多层膜; 磁控溅射; 同步辐射; 太阳 He- II 谱线

中图分类号: O434; TB43 文献标识码: A

SiC/Mg Multilayer Film Reflective Mirror at 30.4 nm

Zhu Jingtao¹ Zhang Shumin¹ Wang Bei¹ Wu Wenjuan¹ Li Cunxia¹ Xu Yao¹
Zhang Zhong¹ Wang Fengli¹ Wang Zhanshan¹ Chen Lingyan¹
Zhou Hongjun² Huo Tonglin²

(¹ Institute of Precision Optical Engineering and Technology, Tongji University, Shanghai 200092)
(² National Synchrotron Radiation Laboratory, University of Science and Technology of China, Hefei 230029)

Abstract: The He- II spectrum at the wavelength of 30.4 nm is a key spectrum in extreme ultraviolet astronomic observation, and multilayer film reflective mirror are usually adapted in the observation. The reflection at the wavelength of 30.4 nm of the multilayer films composed of SiC/Mg, B₄C/Mg, C/Mg, C/Al, Mo/Si, B₄C/Si, SiC/Si, C/Si, Sc/Si is studied. Based on the optimization of largest reflectivity and narrowest width for the multilayer film mirror, SiC/Mg multilayer is selected as the film material, SiC/Mg multilayer films are fabricated by using magnetron sputtering. The periodical thickness of the SiC/Mg multilayer film is measured by X-ray diffractometer, and the reflectivity was measured by the reflectometer in synchrotron radiation laboratory. At incidence angle of 12°, the reflectivity of 38.0% is obtained at the wavelength of 30.4 nm.

Key words: thin film optics; extreme ultraviolet; multilayer film; magnetron sputtering; synchrotron radiation; solar He- II spectrum

1 引 言

随着空间技术和极紫外(EUV)多层膜技术的进步,在大气层外对太阳紫外光谱辐射进行观测已经成为现实^[1~8]。在极紫外波段,太阳日冕有多条谱线可用于观测太阳的活动,如 Fe IV ($\lambda=17.1$ nm),

Fe VII ($\lambda=19.5$ nm), Fe XV ($\lambda=28.4$ nm), He- II ($\lambda=30.4$ nm), Fe XVI ($\lambda=33.5$ nm), 其中波长为 30.4 nm 的 He- II 谱线最为重要^[2~6,14]。空间极紫外太阳望远镜是进行这些观测的重要仪器,由于各种材料在极紫外波段都有强烈的吸收,近入射角光

* 国家自然科学基金(60378021,10675092)、教育部新世纪人才基金(NCET-04-0376)和同济大学理科发展基金。

作者简介: 朱京涛(1978-),男,回族,河南民权人,博士后,主要从事极紫外与软 X 射线多层膜方面的研究。

E-mail: jtzhu@mail.tongji.edu.cn

导师简介: 王占山(1963-),男,吉林东辽人,教授,博士生导师,主要从事短波光子方面的研究。

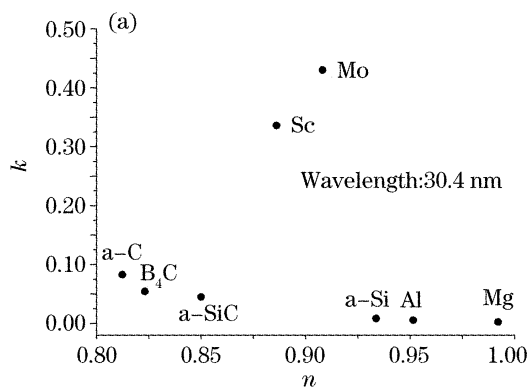
E-mail: wangzs@mail.tongji.edu.cn

收稿日期: 2006-08-08; 收到修改稿日期: 2006-10-15

学系统只能采用多层膜作为反射元件^[2~6]。Si 在 12.4 nm 处存在吸收限,因此,基于 Si 的多层膜材料组合在 13~20 nm 波段有较好的反射特性。特别是在集成电路光刻产业需求的推动下,Mo/Si 多层膜的制备工艺最为成熟,已广泛应用于极紫外光刻与天文观测^[5]。随着波长增加,Mo/Si 多层膜的反射率下降,带宽增大^[5]。更为突出的问题是,工作于 30.4 nm 波段的 Mo/Si 多层膜,其二级衍射峰强度高于工作波长处的反射峰强度,难以满足高分辨天文观测的需要。为此,需要研究工作于 30.4 nm 波长处的新的多层膜材料组合。本文分别研究了基于 Mg 和 Si 的多层膜材料组合在该波段的反射性能,如 SiC/Mg、B₄C/Mg、C/Mg、Mo/Si、B₄C/Si、SiC/Si、C/Si、Sc/Si 等,基于反射率最大与多层膜带宽最小的设计原则,选取 SiC/Mg 作为膜系材料,采用磁控溅射技术制备了近入射角条件下的 SiC/Mg 多层膜,用 X 射线衍射仪测量了多层膜的周期厚度,用同步辐射测量了多层膜的反射率。

2 30.4 nm 波段多层膜反射镜的设计

在极紫外波段,任何材料的折射率都接近于 1,



并有一定的吸收,由菲涅耳公式可知,单层膜的反射率非常低,在 10^{-4} 量级。Spiller 提出^[10],用吸收和间隔材料构成的多层膜结构可以提高极紫外波段的反射率,其实质是薄膜的多光束干涉增强。为了尽可能提高多层膜的反射率,组成多层膜材料的选取应满足^[11]:1)两种材料的折射率差别尽可能大;2)两种材料在工作波段的吸收尽可能小。此外,两种材料能形成连续的膜层,且膜层间界面光滑、相互扩散小。膜层材料的选择可以借助不同材料的折射率和消光系数在 $n-k$ 复平面上的位置进行,图 1(a) 为 30.4 nm 波长处常用材料光学常数在复平面内的表示,由图可知,代表材料的数据点离横轴越近,表明材料的吸收越小,两个点相距越远,代表两种材料的折射率差越大。Mg、Al 和 Si 在该波长处的吸收较小,折射率较大。根据上述的两条选材原则,分别以 Mg 和 Si 为主要材料,以反射率为优化目标,计算了 SiC/Mg、B₄C/Mg、C/Mg、Mo/Si、B₄C/Si、SiC/Si、C/Si、Sc/Si 以及 C/Al 等材料组合的多层膜在该波段的反射性能。图 1(b) 给出了在入射角 10° 条件下,30.4 nm 波长处的反射率随膜对数增加的计算结果。

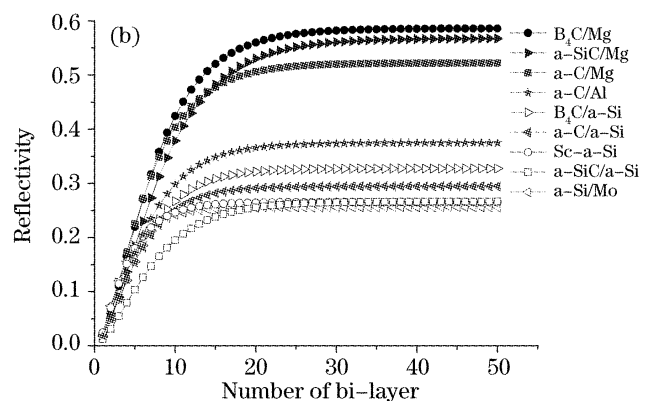


图 1 波长 30.4 nm 处常用材料的光学常数(a),入射角 10° 不同膜系的反射率(b)

Fig. 1 Optical constant of common material (a), reflectivities of different material combinations at incident angle of 10° (b) at the wavelength of 30.4 nm

由图 1(b)可知,所有包含 Mg 的膜系,反射率都比较高。B₄C/Mg 多层膜的理论反射率为 58.16%,SiC/Mg 与 C/Mg 的理论反射率分别为 56.03%和 52.01%。所有包含 Si 的材料组合,反射率都比较低,在计算的膜系中,B₄C/Si 多层膜的反射率最高,为 32.67%,而极紫外波段常用的 Mo/Si 多层膜的在 30.4 nm 波长处的反射率则最低,仅为 25.61%。从图 1(a)给出的材料光学常数看,Al 的折射率介于 Si 与 Mg 之间,计算了 C/Al 多层膜的反射率为 37.33%,也介于 Si 基和 Mg 基膜系的反

射率之间。

在高分辨光谱与成像实验中,既要求多层膜反射率尽可能高,又要求多层膜的带宽(半峰全宽 FWHM)尽量小。表 1 给出了膜对数为 30 对时,不同材料组合的多层膜在 30.4 nm 处的峰值反射率和带宽 $\Delta\lambda$ 。比较可知,SiC/Mg 多层膜同时可以满足反射率较高,且带宽较小的要求,而 Mo/Si 多层膜的反射率较低,且带宽最大。基于反射率最大与带宽最小的设计原则,选取 SiC/Mg 作为 30.4 nm 波长处的膜系材料。

表 1 不同膜系在波长 30.4 nm 处的峰值反射率和带宽(FWHM)(入射角 10°)

Table 1 Peak reflectivities and bandwidths (FWHM) at the wavelength of 30.4 nm and incident angle of 10° for the various multilayer films

Multilayer	Layer thickness /nm	Reflectivity	$\Delta\lambda$ /nm
SiC/Mg	4.41/11.43	0.5603	1.67
B ₄ C/Mg	4.10/11.75	0.5816	1.83
C/Mg	4.12/11.73	0.5201	2.00
C/Al	4.64/11.93	0.3733	1.83
C/Si	5.34/11.63	0.2941	2.00
SiC/Si	6.23/10.71	0.2648	1.50
B ₄ C/Si	5.93/11.10	0.3267	2.00
Sc/Si	3.32/13.34	0.2653	2.00
Mo/Si	3.03/13.61	0.2561	2.33

3 多层膜制备与反射率测量

采用国产超高真空磁控溅射设备(JGP560C6)制备 SiC/Mg 多层膜,本底真空优于 5×10^{-5} Pa,工作气体为 Ar 气(摩尔分数 99.999%),沉积过程中的工作气压为 0.1 Pa。采用恒功率直流溅射模式,Mg 和 SiC 的沉积速率分别为 0.17 nm/s 和 0.10 nm/s。多层膜沉积在 20 mm \times 30 mm 的超光滑硅基片上,基片粗糙度小于 0.3 nm。根据沉积速率,通过计算机控制基片在靶上的停留时间,完成预先设计多层膜的制备^[12]。

采用 X 射线衍射仪(英国 Bede 公司 D1 系统)测量多层膜样品的周期。如图 2 所示,由测试曲线中衍射峰的位置,根据修正的布拉格公式计算得出多层膜的周期 $d=15.93$ nm,比设计值 15.84 nm 略大。X 射线衍射(XRD)拟合数据表明,制备的周期多层膜中 Mg 层的厚度为 11.49 nm, SiC 膜层的厚度为 4.45 nm,都比表 1 中的设计值略大。

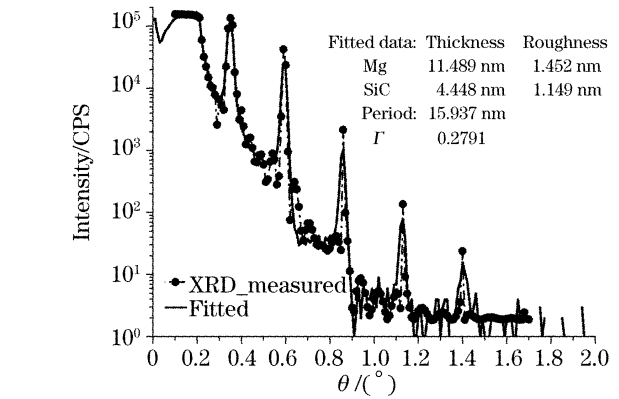
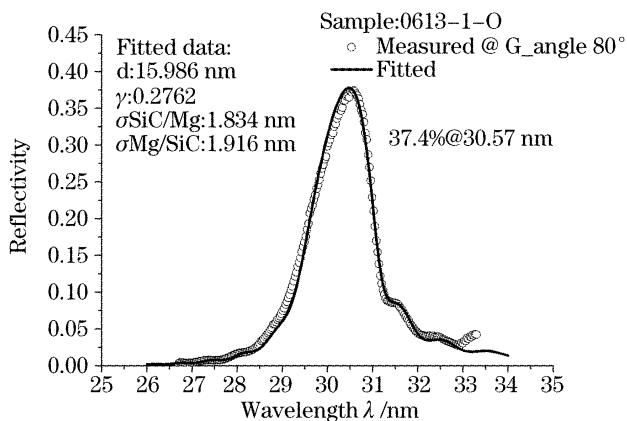


图 2 制备的 SiC/Mg 多层膜小角 X 射线衍射测量及其拟合曲线

Fig. 2 Small-angle X-ray diffraction measured and its fitted curve for SiC/Mg multilayer film

利用国家同步辐射实验室 U27 光束线光谱辐射标准与计量站上的反射率计,测试制备的 SiC/Mg 多层膜的反射率。为了抑制高次谐波的影响,在光路中插入 Al 滤片。在设计角度进行波长扫描,测量反射率,测试结果如图 3(a)所示。在入射角 10° (掠入射角 80°)的条件下,多层膜的峰位为 30.57 nm,偏离了设计波长(30.4 nm)。对图 3(a)的反射率测量数据进行拟合^[13],拟合数据与图 2 中 X 射线衍射拟合数据基本一致。多层膜周期厚度为 15.97 nm,表明制备的多层膜周期比设计值(15.93 nm)略大。改变入射角为 12° ,测得 30.36 nm 处峰值反射率为 38.0% [如图 3(b)所示],反射率测量值与理论计算的比值(R_E/R_T)为 0.679。图 3 对同步辐射测量的拟合结果表明,多层膜的界面粗糙度为 1.8 nm 左右,界面粗糙度是造成多层膜反射率低于理论值的主要原因。通过优化制备工艺,减小多层膜界面粗糙度,提高膜层质量,多层膜的反射率有望进一步提高。与极紫外波段常用的 Mo/Si 多层膜相比较,由图 1(b)可知,Mo/Si

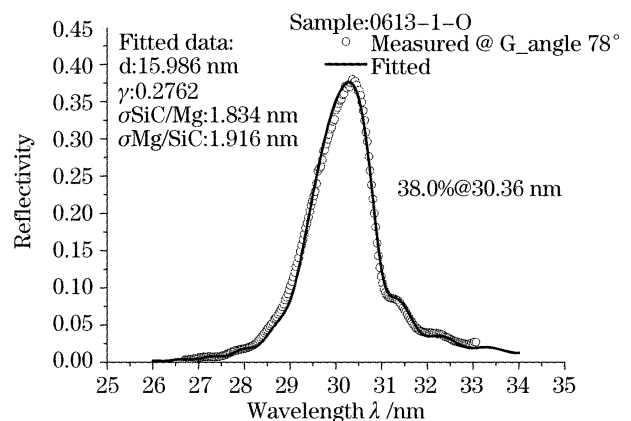


图 3 入射角 10° (a), 12° (b)同步辐射测量 SiC/Mg 多层膜的反射率及其拟合曲线

Fig. 3 Reflectivity of SiC/Mg multilayer measured by synchrotron radiation at incident angle of 10° (a), 12° and its fitted curve

多层膜在 30.4 nm 波长处的理论反射率仅为 25.6%，因此，现有工艺条件下制备的 SiC/Mg 多层膜的反射率显著高于目前广泛使用的 Mo/Si 多层膜。

4 结 论

优化设计了工作波长为 30.4 nm 的不同材料组合的多层膜反射镜，基于反射率最大与带宽最小的优化原则，确定 SiC/Mg 为该波段的最佳材料组合。采用磁控溅射技术制备了入射角 10° 条件下的 SiC/Mg 多层膜，并在同步辐射光源上测量多层膜的反射率。在入射角 12° ，30.4 nm 处的峰值反射率为 38.0%。与极紫外波段常用的 Mo/Si 多层膜相比，反射率显著提高。

由于多层膜反射镜工作在空间环境下，需要进一步研究 SiC/Mg 多层膜的热稳定性以及高能粒子辐射的影响。此外，多层膜反射率测量值与理论计算值有较大差距 ($R_E/R_T=0.679$)，说明多层膜界面粗糙度较大，制备工艺有待进一步优化，需要开展有关环境耐受实验和工艺改进实验。

参 考 文 献

- 1 Zhang Zhong, Wang Zhanshan, Qin Shuji *et al.*. The design of X-ray supermirror with broad angle range[J]. *Acta Photonic Sinica*, 2003, **32**(2): 253~256 (in Chinese)
张 众,王占山,秦树基等. 宽角度 X 射线超反射镜的设计[J]. 光子学报, 2003, **32**(2): 253~256
- 2 L. Garder, J. Kohl, S. Cranmer *et al.*. The advanced solar coronal explorer mission[C]. *Proc. SPIE*, 1999, **3764**: 134~146
- 3 J. C. Vial, X. Y. Song, P. Lemaire *et al.*. The solar high-resolution imager-coronagraph LYOT mission[C]. *Proc. SPIE*, 2003, **4853**: 479~489

- 4 Marius Grigonis, Emile J. Knystautas. C/Si multilayer mirrors for the 25~30 nm wavelength region[J]. *Appl. Opt.*, 1997, **36**(13): 2839~2842
- 5 M. F. Ravet, F. Bridou, Song X. Zhang *et al.*. Ion beam deposited Mo/Si multilayers for EUV imaging application in astrophysics[C]. *Proc. SPIE*, 2004, **5250**: 99~108
- 6 D. L. Windt, S. Donguy, J. Seely *et al.*. EUV multilayers for solar physics[C]. *Proc. SPIE*, 2004, **5168**: 1~11
- 7 Fengli Wang, Zhanshan Wang, Shuji Qin *et al.*. Investigation of ultra-short-period W/C multilayers for soft X-ray optics[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2005, **3**(7): 425~427
- 8 Zhong Zhang, Zhanshan Wang, Fengli Wang *et al.*. Design and fabrication of broad angular depth-graded C/W multilayer mirror for hard X-ray optics[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2005, **3**(7): 422~424
- 9 Chen Bo, Ni Qiliang, Cao Jihong *et al.*. Development of a space soft X-ray and EUV normal incidence telescope[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2003, **11**(4): 315~319 (in Chinese)
陈 波,尼启良,曹继红等. 空间软 X 射线/极紫外波段正入射望远镜研究[J]. 光学精密工程, 2003, **11**(4): 315~319
- 10 Eberhard Spiller. Reflective multilayer coatings for the far UV region[J]. *Appl. Opt.*, 1976, **15**(20): 2333~2338
- 11 Wang Zhanshan, Ma Yueying. Researches on extreme ultraviolet multilayers fabrication[J]. *Optical Technique*, 2001, **27**(6): 532~534 (in Chinese)
王占山,马月英. 极紫外多层膜制备工艺研究[J]. 光学技术, 2001, **27**(6): 532~534
- 12 Wang Zhanshan. Effect of film thickness errors on performance of soft X-ray multilayer[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2003, **11**(2): 136~138 (in Chinese)
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
- 13 Wang Hongchang, Wang Zhanshan, Qin Shuji *et al.*. Analysis of the reflectivity of Mo/Si multilayer film for soft X-ray[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(11): 1362~1365 (in Chinese)
王洪昌,王占山,秦树基等. 软 X 射线 Mo/Si 多层膜反射率拟合分析[J]. 光学学报, 2003, **23**(11): 1362~1365
- 14 Zhanshan Wang, Shumin Zhang, Wenjuan Wu *et al.*. B₄C/Mo/Si high reflectivity multilayer mirror at 30.4 nm[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2006, **4**(10): 608~610