

45°角入射的 13.1 nm 软 X 射线 多层膜的研制*

邵建达 易 葵 范正修 王润文 袁利祥

(中国科学院上海光机所 上海 201800)

提要 报道了对 45°入射角高反的 13.1 nm 软 X 射线多层膜反射镜的研制情况。利用在星光装置中进行的软 X 射线激光等离子体实验测量多层膜反射率的方法, 获得了 26.2% 的实测反射率, 该反射率已达到理论反射率的 70%。

关键词 软 X 射线多层膜, 反射率, 反射率测量

1 引 言

软 X 射线多层膜作为软 X 射线光学和软 X 射线激光研究中的关键元件, 其反射率的些许提高就有可能对整个光学系统性能有极大的改进。因此在软 X 射线多层膜的研制中, 努力提高多层膜的反射率是该领域目前的最主要目标。Mo/Si 多层膜在以往的大量研究中已给出了令人兴奋的结果, 0°入射的 Mo/Si 多层膜已报道了 65% 左右的高反射率^[1,2]。但在国内测得的反射率仍停留在较低的水平上。

由于难以获得稳定的软 X 射线光源, 使得对多层膜实际反射率的测量变得十分困难。在国内, 已有报道利用 Henke 型电子束轰击金属靶获得软 X 射线的反射率测量装置^[3], 及北京高能物理研究所同步辐射实验室的反射率测量装置^[4]。而利用软 X 射线激光等离子体进行软 X 射线多层膜反射率测量在国内尚未见报道。

Mo/Si 多层膜膜系在 13 nm 附近的软 X 光区有着十分优良的光学性能。本文选取了 45°入射的 13.1 nm 软 X 射线高反膜设计, 并利用 LF-11 激光装置进行的软 X 射线激光等离子体实验测量多层膜反射率的方法, 获得了 26.2% 的实测反射率, 该反射率已达到理论反射率的 70%。

2 多层膜的设计

从光学薄膜的角度来看软 X 射线多层膜的光学特性问题, 软 X 射线多层膜仍未脱离光学薄膜的范畴。光学薄膜的一般理论完全可以应用到软 X 射线多层膜的光学特性计算中。并且其膜系设计所给出的结果与常规光学薄膜的设计有十分一致的结构类型^[5]。

* 国家自然科学基金资助项目。

收稿日期: 1997-02-14; 收到修改稿日期: 1997-05-26

表 1 给出了 45° 入射对 13.1 nm 高反多层膜的理论设计结构参数和反射率。设计中采用的是由 Henke 给出的原子散射因子^[6]推得的光学常数。这里选择了 41 个膜层数, 是因为多层膜在这个膜层数下, 其反射率已趋向饱和, 如图 1 所示。

表 1 45° 入射对 13.1 nm 高反多层膜的理论设计结构参数与反射率

Table 1 Theoretical structure parameters and reflectivity of a soft X-ray multilayer with a 45° incidence angle at 13.1 nm wavelength

multilayer wavelength	incidence angle	layers	d_{Mo}	d_{Si}	R	R_s	R_p
Mo/Si	13.1 nm	41	3.621	6.076	36.78%	73.69%	1.80%

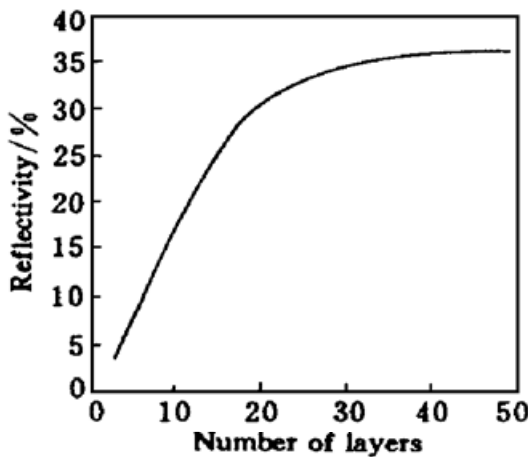


图 1 45° 入射对 13.1 nm 波长设计的 Mo/Si 多层膜理论反射率与膜层数的关系

Fig. 1 The relationship between theoretical reflectivity and the number of layers of a Mo/Si multilayer at 45° incidence angle and 13.1 nm wavelength

3 多层膜的淀积

多层膜的淀积是在磁控溅射装置上进行的。沉积装置为两直径为 $\phi 80$ mm 左右的平面靶结构。在沉积过程中两靶同时开启, 利用固定挡板, 保证基片在每个靶的上方得到淀积, 基片的转动使其周而复始地获得轮流淀积的多层膜结构。在选定的溅射功率下, 又可以依靠基片架的转动速度的调节来监控每层膜的厚度, 获得高精度的多层膜结构。具体的结构和监控原理在我们的早期工作中有详细的描述^[7]。在淀积本文的多层膜时, 使用了直流电源溅射 Mo 靶, 其电流为 0.2 A; Si 靶用射频电源驱动, 使用的功率为 400 W。转速测定为 0.74 r/min。

沉积装置使用了机械泵和分子泵真空系统维持真空, 其本底真空为 2.2×10^{-3} Pa, 溅射真空为 0.5 Pa。溅射气体是高纯 Ar 气, 标定纯度为 99.99%。

4 多层膜的结构性能测试

多层膜的结构性能测试方法一般有小角 X 射线衍射测试方法来标定多层膜的周期厚度和拟合多层膜实际结构中存在的缺陷^[6]。而由透射电子显微镜给出的多层膜的剖面图则能直观地显示多层膜的分层结构, 而结合图像的计算机数字处理技术, 能方便地给出多层膜结构中界面上的渗透层厚度^[8]。

图 2 给出了该多层膜的小角 X 射线衍射测试结果。测试是用一台由计算机控制的日本理学 D/max-3C 全自动 X 射线衍射仪来完成的, 扫描步长为 0.01° , 扫描速度为 $2^\circ/\text{min}$, 测试中根据不同的掠入射角度而改变加速电压和束流, 分区间进行。

图 3 给出了透射电子显微镜的多层膜剖面图。从图中不难看到多层膜分层结构明显, 界面清晰。

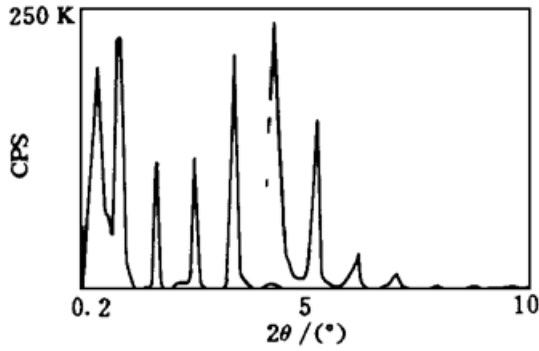


图 2 多层膜的小角 X 射线衍射谱, 其中给出的峰位依次为 1.08, 1.93, 2.81, 3.69, 4.61, 5.48, 6.40, 7.29, 8.21, 9.14

Fig. 2 Measured reflectivity vs angle of the Mo/Si multilayer. The peaks located at 1.08, 1.93, 2.81, 3.69, 4.61, 5.48, 6.40, 7.29, 8.21, and 9.14 grazing angles (degree) respectively

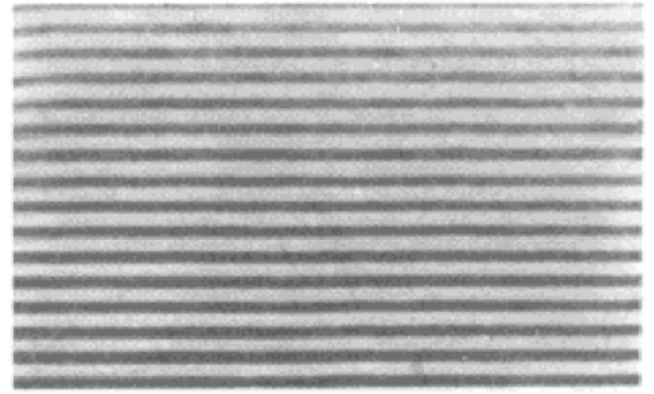


图 3 Mo/Si 多层膜的透射电子显微镜照片
Fig. 3 Cross-section micrograph of a Mo/Si multilayer by high resolution transmission electron microscopy

5 反射率测量

反射率测量的具体方法在文献[9]中已有详细的说明,其基本原理是利用软 X 射线激光等离子体实验的软 X 射线作为光源,平焦场光栅谱仪^[10]作为色散分光元件。用柯达-101 底片记录反射与原始谱线,然后按照黑密度值得到入射光强和反射光强相对值从而得到反射率。具体的细节可以参考文献[9]。图 4 给出了利用该方法所测得的反射率与波长的曲线。图 5 给出了反射率随入射角度变化的曲线。

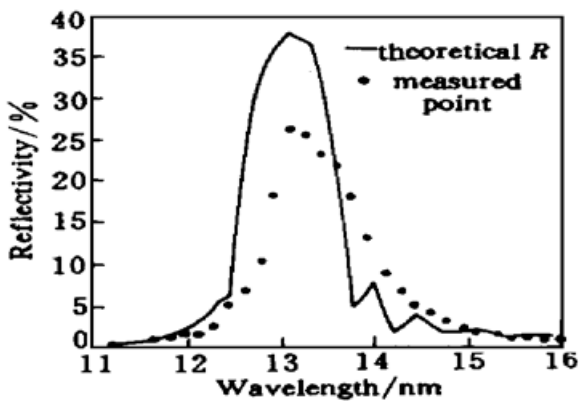


图 4 实测反射率随波长变化曲线, 实心点是实测的反射率

Fig. 4 Measured points of the reflectivity of the Mo/Si multilayer vs wavelength at the 45° incidence angle. Dots represent the measured points

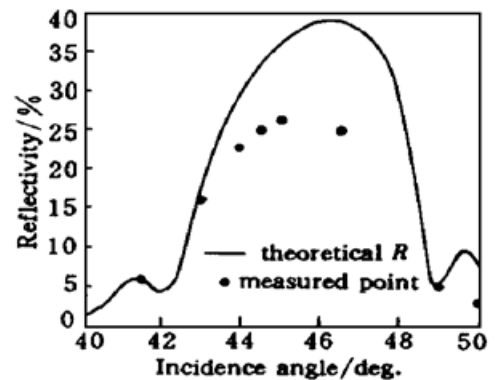


图 5 反射率随入射角的变化曲线, 测量点是图中的实心点

Fig. 5 Measured points of the reflectivity of the Mo/Si multilayer vs incidence angle at 13.1 nm. Dots represent the measured points

6 讨 论

从给出的 MO/Si 多层膜的结构特性测试结果与软 X 射线激光等离子体反射率测量结果来看,该多层膜已具备了比较好的反射特性。考虑到 45°入射的多层膜反射镜,其 S 与 P 分量的反射率有较大的差异,即基本上在这个入射角度下,软 X 射线的反射将基本上是 S 分量的反射。其反射率已接近理论反射率。

作为评价多层膜的最终性能,在缺乏反射率实际测量手段的情况下,小角 X 射线衍射谱与透射电子显微镜的剖面结构图能给出很多的信息,从而推断出多层膜的实际结构参数,用来估计多层膜的可能反射率。而反射率的测量是一个最客观的手段,是对多层膜结构的最终评价。从这一点上来说,本文给出的多层膜软 X 射线反射率体现了较高的多层膜沉积水平。

当然,如果考虑该多层膜所采用的技术条件来看,如沉积系统的本底真空相对来说较低,尤其是其基底的表面粗糙度值,经 ZYGO 光学干涉轮廓仪测试,其值稳定在 1.1 nm 左右。从国内外报道的多层膜研制结果来看,绝大部分的基片其表面均方根粗糙度值在 0.5 nm 以下。如果从估算多层膜带粗糙度影响的反射率的德拜-威廉因子公式

$$R = R_0 \exp[-2(2\pi\sigma \cos\alpha/\lambda)^2]$$

以 $\sigma = 1.1 \text{ nm}$ 代入,在 13.1 nm 波长,45°入射情况下,考虑粗糙度的反射率 R 与理想反射率 R_0 之间的关系为 $R = 0.75R_0$ 。如果考虑到实际情况中存在的界面渗透层中的厚度为 1 nm 左右,那么本文认为,该多层膜如果撇开粗糙度与界面渗透层的影响,其它缺陷的存在已基本消失,最主要的是用来评价多层膜沉积水平的膜厚监控的随机误差已趋向于零。作为一种估计,如果本文的多层膜能采用基底均方根粗糙度在 0.5 nm 左右,则其反射率将是现测得的反射率的 1.25 倍,即 32.8%,已达到理论反射率的 89%。以上的分析当然存在一定的误差,原因在于德拜-威廉因子所给出的对反射率的影响可能偏大。从而在比较直观测得粗糙度的情况下,在分析中容易低估其它缺陷存在的影响。而且从我们的早期工作来看,已有的实验证据表明在软 X 射线波段,其超薄膜的沉积有改进基底表面质量的效果^[11]。所以该膜系中,最终膜面的粗糙度值应当略小于基底的原始粗糙度值。

文中的分析是在假定入射反射镜面的软 X 射线均为中性的情况下进行的,但是由于测量系统中使用了光栅作为色散元件,也就引进了软 X 射线偏振情况的不确定性。精确的分析有待于在实际软 X 射线偏振态确定后进行。因此在以后的反射率测量中还应该对系统进行改进以确定入射射线的偏振态,最简单的办法,本文认为可以在被测镜面的前端再放置一块同样的 45°入射的反射镜,理论计算说明这样的结构当能给出较好的 S 偏振软 X 射线光源。

致谢 作者衷心感谢中国工程物理研究院上海激光等离子体研究所的王世绩、顾援、熊岳南使用该多层膜,并提供了图 4,图 5 的实际反射率测量结果。

参 考 文 献

- 1 D. G. Stearns, R. S. Rosen, S. P. Vernon. Multilayer mirror technology for soft X-ray projection lithography. *Appl. Opt.*, 1993, **32**: 6952~ 6960
- 2 G. Gutman. High-performance Mo/Si and W/B4C multilayer mirrors for soft X-ray imaging optics. *J. X-ray Sci. Technol.*, 1994, **4**: 142~ 150
- 3 Y. H. Guo, Z. X. Fan, O. Bin *et al.*. Determination of optical constants of thin film in the soft X-ray region. *SPIE*, 1991, **1519**: 327~ 332

- 4 Xu Zhenglian, Sun Jianhui. Measuring and control system for synchrotron radiation soft X-ray multilayer reflectometer. *Optics and Precision Engineering*(光学精密工程), 1995, **3**(1) : 45~ 49 (in Chinese)
- 5 Fan Zhengxiu, Jin Lei, Shao Jianda. Optical properties and optimum design of soft X-ray multilayer. *Chinese J. Lasers* (中国激光), 1992, **A19**(1) : 74~ 78 (in Chinese)
- 6 Yin Gongjie, Fan Zhengxiu, Shao Jianda. Exact structure determination of Mo/Si soft X-ray multilayer by small angle diffraction. *Chinese J. Lasers* (中国激光), 1993, **A20**(12) : 900~ 905 (in Chinese)
- 7 Shao Jianda, Fan Zhengxiu, Jin Lei *et al.*. Rotation-speed-controlled layer thickness of soft X-ray multilayer reflector. *Chinese J. Lasers* (中国激光), 1991, **18**(3) : 171~ 175 (in Chinese)
- 8 Shao Jianda, Fan Zhengxiu, Wang Guiying *et al.*. Analysis of the structure and interfaces of multilayer using high-resolution transmission electron microscopy. *Chinese J. Lasers* (中国激光), 1994, **A21**(6) : 457~ 462
- 9 Xiong Yuenan, Ni Yuanlong, Wu Jiang *et al.*. Reflective characteristics of a soft X-ray multilayer mirror. *Acta Optics Sinica* (光学学报), 1997, **17**(2) : 243~ 248 (in Chinese)
- 10 Shao Jianda, Fan Zhengxiu, Yi Kui *et al.*. The roughness of the very thin Si films. *Chinese J. Lasers* (中国激光), 1996, **A23**(9) : 801~ 805 (in Chinese)

Deposition and Absolute Reflectivity Measurements of a Mo/Si Multilayer for 13.1 nm Soft X-ray at 45° Incidence Angle

Shao Jianda Yi Kui Fan Zhengxiu Wang Runwen Yuan Lixiang

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800)

Abstract Reported here is a result of absolute reflectivity measurement carried out in a soft X-ray laser plasma experiment. A 26.2% reflectivity Mo/Si multilayer for 13.1 nm soft X-ray at the 45° incidence angle is obtained.

Key words soft X-ray multilayer, reflectivity, absolute reflectivity measurement