

# C/Al 软 X 射线多层膜反射镜\*

吕俊霞 马月英 裴舒 曹健林

(中国科学院长春光机所应用光学国家重点实验室 长春 130022)

**提要** 在 $\lambda=28.5$  nm 波长处,选择了一种新的多层膜材料对 C/Al。与 Mo/Si, C/Si 软 X 射线多层膜相比,正入射 C/Al 多层膜在 15.0 nm 附近有很低的二级衍射峰。用磁控溅射法制备了 C/Al 软 X 射线多层膜样品,并用 X 射线小角衍射法对其结构进行了测试。

**关键词** 软 X 射线,正入射,多层膜反射镜

## 1 引言

最近十几年来,作为软 X 射线光学系统关键元件的软 X 射线多层膜技术发展很快,特别是 12.4~20.0 nm 波段的 Mo/Si 多层膜的制备技术。目前在 13.5 nm 波长处反射率最高可达 65%<sup>[1]</sup>。近年来,据我们所知,软 X 射线多层膜的研究工作大多集中在短波长( $\lambda < 10.0$  nm 波段)软 X 射线区<sup>[2,3]</sup>,特别是水窗波段(2.4~4.4 nm)<sup>[4]</sup>,很少有人开展长波长( $\lambda > 20.0$  nm)软 X 射线多层膜的研究<sup>[5]</sup>,有的用工艺比较成熟的 Mo/Si 多层膜来代替。国内,在 $\lambda > 12.4$  nm 波段,实用的反射镜全部是 Mo/Si 多层膜。但是在实际应用中,却存在着一个比较突出的问题:长波长的 Mo/Si 多层膜反射镜的二级衍射峰(位于 13.0~17.0 nm 间)强度远远高于工作波长区的反射峰强度,严重影响了成像质量及其他一些研究工作的进行。针对这一问题,我们选用新的多层膜材料对 C/Al,开展工作波长为 28.5 nm 的多层膜研究工作。

## 2 理论计算

由于 Si 在 12.4 nm 波长处存在吸收限,使得 Mo/Si 多层膜在 13.0~20.0 nm 波长区有极好的反射特性,即使工作在该波段的是二级衍射峰,其峰强度也远远超过其一级峰的强度(位于 $\lambda > 20.0$  nm 波段)。因此若要减少长波长区多层膜的二级衍射峰的强度,必须选择新的多层膜材料对。普通的软 X 射线多层膜通常是由高 Z/低 Z 材料构成的,Z 表示原子序数,在这里我们仅从材料的光学特性出发,而不考虑这一原则,选择低 Z/低 Z 材料作为多层膜材料。这样一来多层膜的反射率可能稍有下降,但从模拟计算结果来看,对抑制二级衍射峰强度效果很好。

由于软 X 射线波段薄膜材料缺少准确的光学常数,给计算、设计带来一些误差。我们根据

\* 国家科委 863 高科技项目资助课题。

收稿日期: 1998-03-13; 收到修改稿日期: 1998-05-25

Henke 等给出的材料的原子散射因子<sup>[6]</sup>,对不同材料的多层膜特性进行估计。首先由于 Si 和 Al 在长波长软 X 射线区吸收系数较小的特性而选择它们作为间隔层材料。然后根据光学薄膜理论,设计了 28.5 nm 波长的 C/Si, C/Al 多层膜结构参数,并计算了它们在软 X 射线光谱区的一级、二级反射峰曲线,如图 1 (a), (b) 所示。为便于与 Mo/Si 多层膜的反射特性相比较,图 1 (c) 给出其反射特性。图中的膜层数均为 50。

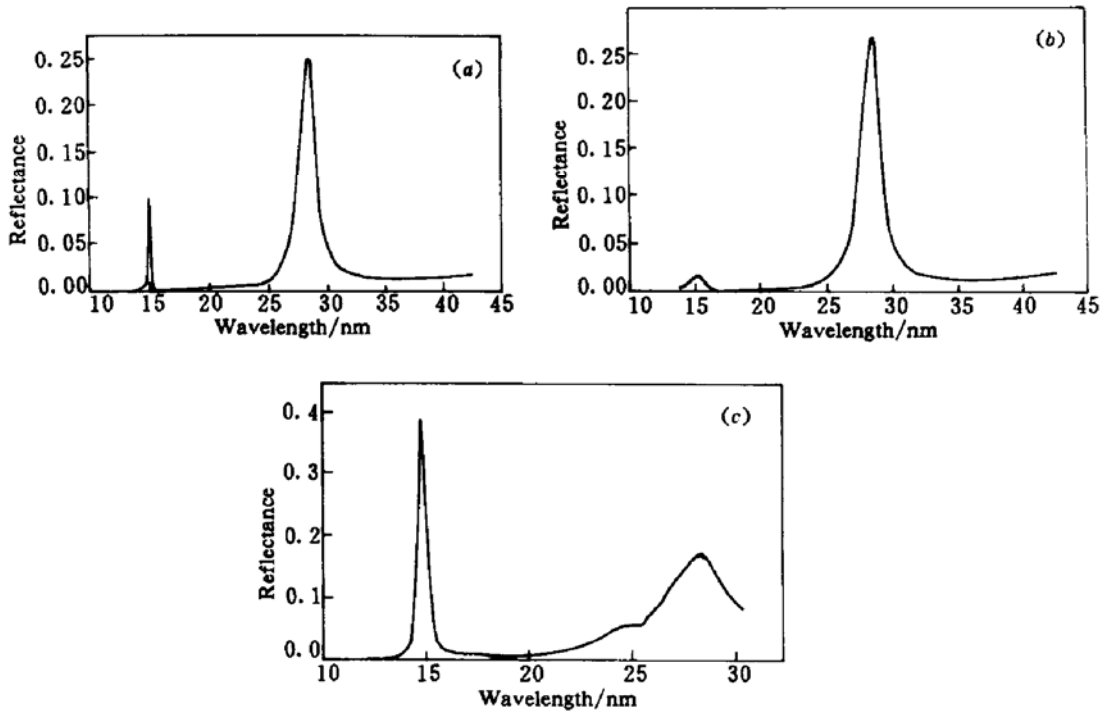


图 1 28.5 nm 波长的多层膜反射曲线

Fig. 1 Theoretical reflectance of a multilayer at the wavelength of 28.5 nm

(a) C/Si; (b) C/Al; (c) Mo/Si

从图 1 可以看出, Mo/Si 多层膜的二级峰强度远高于一级峰, C/Si 多层膜二级峰略有下降, C/Al 多层膜的二级峰则变得很弱。主要原因是 C 和 Al 两种材料在二级峰位置附近光学常数差别小, 吸收强, 反射弱。

考虑到磁控溅射镀膜设备的要求, 同时制备两种非金属材料有困难, 因此选择 C/Al 作为多层膜材料, 其结构参数为: 周期膜厚为 15.2 nm, C 占周期厚度的 0.3, 膜层数为 41。

### 3 实验及结果分析

我们采用磁控溅射法制备 C/Al 软 X 射线多层膜。制备长波长软 X 射线多层膜, 膜厚控制相对较容易, 但是由于 Al 易氧化, 可能会使膜层材料的光学常数变化。因此制备样品时真空室的真空度应尽量提高, 本实验中本底真空度为  $1.0 \times 10^{-3}$  Pa, 溅射过程中 Ar 气压小于 0.2 Pa。在制备过程中, 为去除 Al 靶表面的氧化物, 先进行较长时间 (5~10 min) 的预溅射, 另外样品最后一层为 C 膜。Al 采用直流磁控溅射法, 功率为 60 W; C 采用射频磁控溅射法, 功率为 200 W。经精确定标, Al 和 C 的溅射速率分别为 0.20 nm/s 和 0.08 nm/s。

样品基片为表面粗糙度均方根值小于 1.0 nm 的超光滑 Si 片或 BK7 玻璃基片。

利用 X 射线衍射仪对 C/Al 多层膜样品进行小角测试, 波长为 0.154 nm 的 Cu K $\alpha$  谱线, 光源功率为 20 kV $\times$ 5 mA。图 2 给出样品的测量结果。图中三级衍射峰清晰, 衍射峰间隔角度均匀, 这说明膜层结构较好。衍射峰强度较 Mo/Si 多层膜的低很多, 除存在的一些界面质量问题外, 主要原因是 C 和 Al 的光学常数在 0.154 nm 波长处相差较小, 分别为  $0.99999273 + i1.16E - 8$ ,  $0.99999151 + i1.55E - 7$ <sup>[6]</sup>, 根据薄膜反射理论, 其界面反射率很小。该波长处 Mo 和 Si 的光学常数为  $0.9999712 + i1.88E - 6$  和  $0.99999241 + i1.73E - 7$ <sup>[6]</sup>。从衍射峰的位置计算出多层膜的周期膜厚为 15.0 nm。

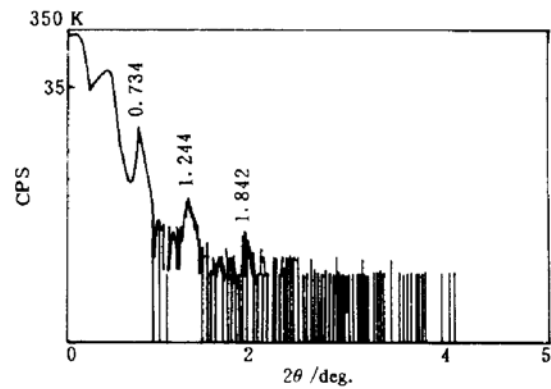


图 2 C/Al 多层膜反射镜在  $\lambda = 0.154$  nm 处的小角衍射曲线

Fig. 2 Measured grazing-incidence diffraction at  $\lambda = 0.154$  nm for a C/Al multilayer mirror

### 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**(34): 6952~6960
- 2 D. G. Stearns, R. S. Rosen, S. P. Vernon. Normal-incidence X-ray mirror for 7 nm. *Opt. Lett.*, 1991, **16**(16):1283~1285
- 3 C. Montcalm, B. T. Sullivan, S. Duguay *et al.*. In situ reflectance measurements of soft-X-ray/extreme-ultraviolet Mo/Y multilayer mirrors. *Opt. Lett.*, 1995, **20**(12):1450~1452
- 4 A. I. Fedorenko, V. V. Kondratenko, Yu. P. Pershin *et al.*. Synthesis and measurement of normal incidence X-ray multilayer mirrors optimized for a photon energy of 390 eV. *Proc. SPIE*, 1993, **2012**:198~208
- 5 M. Grigonis, E. J. Knystautas. C/Si multilayer mirrors for the 25~30-nm wavelength region. *Appl. Opt.*, 1997, **36**(13):2839~2842
- 6 B. L. Henke, E. M. Gullikson, J. C. Davis. X-ray interactions; photoabsorption, scattering, transmission, and reflection at  $E = 50 \sim 30,000$  eV,  $Z = 1 \sim 92$ . *Atom. Data and Nucl. Tables*, 1993, **54**:181~342

## C/Al Soft X-ray Multilayer Mirrors

Lü Junxia Ma Yueying Pei Shu Cao Jianlin

(Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Changchun 130022)

**Abstract** A new material combination, C/Al, for normal-incidence multilayer mirrors at the wavelength  $\lambda = 28.5$  nm is reported. Compared with Mo/Si, and C/Si multilayers, the C/Al mirrors have the lower second-order peak at the 15.0 nm. The C/Al soft X-ray multilayer, fabricated by magnetron sputtering, was characterized by grazing-incidence X-ray diffraction.

**Key words** soft X-ray, normal incidence, multilayer mirrors