

正入射 $\text{Mo}/\text{B}_4\text{C}$ 软 X 射线多层膜*

吕俊霞 马月英 张俊平 曹健林

(中国科学院长春光学精密机械研究所, 长春 130022)

摘 要 采用 $\text{Mo}/\text{B}_4\text{C}$ 材料在短波长波段 ($\lambda < 10.0 \text{ nm}$) 进行软 X 射线多层膜实验研究。在指定波长 (8.0 nm 附近) 处对多层膜进行结构设计, 并制备出了周期结构准确的 $\text{Mo}/\text{B}_4\text{C}$ 多层膜样品。

关键词 软 X 射线, $\text{Mo}/\text{B}_4\text{C}$ 多层膜, 正入射。

1 引 言

软 X 射线波段内任何材料都有吸收, 使得该波段缺乏有效的反射元件。随着纳米级技术的发展, 软 X 射线多层膜技术逐步解决了这一难题。软 X 射线光学的各个应用领域都已成功地使用了软 X 射线多层膜正入射系统。

目前, 软 X 射线光学正在向更短波长 ($\lambda < 10.0 \text{ nm}$) 方向发展。因为工作波长越短, 成像的衍射极限分辨率越高, 这在天文学、生物显微术等许多领域具有很重要的意义。美国、加拿大等国家的多家研究小组不断选用新的材料对^[1-5], 在该波段进行正入射多层膜的研究工作。由于该波段正入射多层膜每一材料层厚度只有 $1\sim 2 \text{ nm}$, 且对膜层质量要求也很高, 因此制备这样的多层膜非常困难。实际制备出的多层膜反射率都很低, 在 $7.0\sim 10.0 \text{ nm}$ 波段, 最高只有理论值的一半 (20% 左右); 而水窗波段 ($2.3\sim 4.4 \text{ nm}$), 最高只有 $2\sim 3\%$ 。

中国科学院长春光学精密机械研究所最近几年在 10.0 nm 以上多个波长处已制备出性能参数达到国际先进水平的 Mo/Si 多层膜反射镜^[6], 成功地用于国内外各类软 X 射线光学技术研究中。本文说明如何选用新的材料对制备短波长软 X 射线多层膜, 并选用 $\text{Mo}/\text{B}_4\text{C}$ 作为多层膜材料研制 $\lambda < 10.0 \text{ nm}$ 的正入射多层膜。

2 材料选择与模拟设计

软 X 射线多层膜是由吸收层材料和间隔层材料两种材料交替组合构成的人工类晶状结构。根据多层膜理论, 不同波长处, 使用的多层膜材料也不同。首先选择吸收小的材料作为间隔层材料。在 $\lambda < 10.0 \text{ nm}$ 波段内, B_4C 的吸收很小, 且可与多种材料形成光滑、稳定的界面层, 是近期人们比较感兴趣的材料之一。然后在指定波长处, 根据多种材料的光学常数,

* 国家自然科学基金和国家科委 863 高科技资助项目。

收稿日期: 1996-07-21; 收到修改稿日期: 1997-04-11

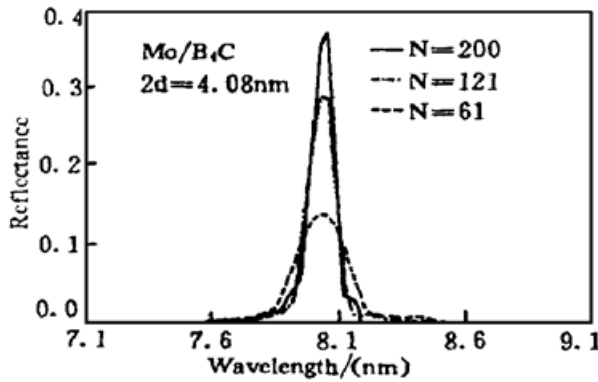


Fig. 1 Theoretical reflectance of Mo/B₄C multilayer film

中心波长处理论反射率达到 38%。

3 样品制备

Mo/B₄C 软 X 射线多层膜采用磁控溅射法制备。磁控溅射法具有高速、低温、低损伤等特点，制备出的薄膜膜层致密、均匀、性能好。实验中使用的是一台 FJP-600 型磁控溅射与离子束溅射复合镀膜设备中的磁控溅射部分。其中 Mo 采用直流磁控溅射，B₄C 采用射频磁控溅射，溅射功率分别为 45 W 和 300 W，靶面和样品间距分别是 13.5 cm 和 8.5 cm。

样品基片为表面粗糙度均方根低于 0.5 nm 的超光滑 Si 片。真空室本底真空度达到 $6 \sim 8 \times 10^{-4}$ Pa，充入工作气体(Ar)后，工作气压维持在 0.2 Pa。

4 检测结果

利用 X 射线衍射仪小角测量法对制备的 Mo/B₄C 多层膜进行周期厚度测量。由修正后的布拉格公式^[8]可计算出多层膜的周期厚度 D ：

$$m\lambda = 2D [\sin \theta_m - (1 - n)/\sin \theta_m]$$

式中 m 为衍射级次， θ_m 为相应衍射角， λ 为 X 射线波长， n 为一个周期内材料折射率的平均值。测出 m 和相应的 θ_m 后，用最小二乘法线性拟合，可精确确定出周期厚度 D 。

实验中使用的衍射仪是日本理学公司生产的 D/MAX-3B 型 X 射线衍射仪，输出 CuK α 谱线 ($\lambda = 0.154$ nm)。图 2 给出 121 层 Mo/B₄C 多层膜样品的衍射曲线，与衍射级次 1、2、3、4 所对的衍射角分别为 2.382°、4.430°、6.528°、8.608°。设计的周期厚度 D_0 为 4.08 nm，制备的多层膜厚度 D 为 4.12 nm。从结果可以看出制备的 Mo/B₄C 多层膜样品周期性很好，周期厚度和设计值符合很好。

选择与 B₄C 匹配的吸收层材料。作者确定多层膜的工作波长为 8.0 nm 附近，选择 Mo 作为吸收层材料。

为在指定波长处制备出结构准确的软 X 射线多层膜样品，制备前应先完成多层膜结构的设计和模拟计算。作者根据 Henke 等人^[7]给出的原子散射因子计算得到 Mo、B₄C 材料的光学常数，计算出工作波长在 8.0 nm 附近正入射 Mo/B₄C 多膜的最佳膜厚周期为 4.08 nm，单层 Mo 在周期厚度所占比例为 0.42。图 1 给出了不同膜层数多层膜的理论反射率曲线。从图中可以看出 200 层 Mo/B₄C 多层膜

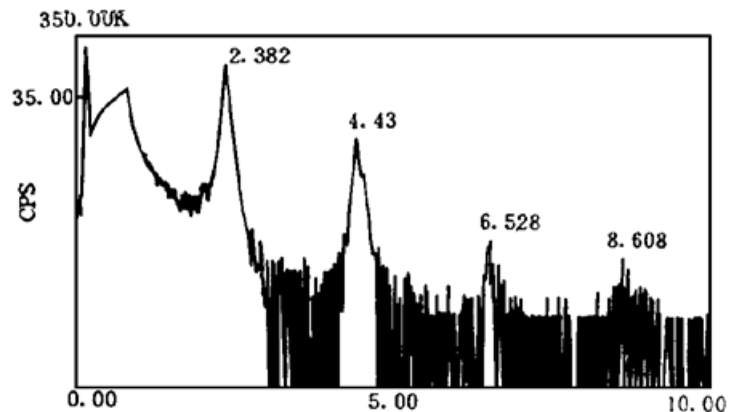


Fig. 2 Diffraction curve of Mo/B₄C multilayer film of 121 layers

结束语 文中选用 Mo/B₄C 作为短波长 ($\lambda < 10.0$ nm) 范围的新的镀膜材料, 同时, 根据在具体波长处 (8.0 nm 附近) 设计的多层膜参数, 制备出了结构准确的多层膜样品。

参 考 文 献

- [1] D. G. Stearns, R. S. Rosen, S. P. Vernon, Normal-incidence X-ray mirror for 7 nm. *Opt. Lett.*, 1991, **16**(16) : 1283~ 1285
- [2] A. F. Jankowski, P. L. Perry, Characterization of Mo/B₄C multilayer. *Thin Solid Films*, 1991, **206** : 365~ 368
- [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] J. F. Seely, G. Gutman, J. Wood *et al.*, Normal-incidence reflectance of W/B₄C multilayer mirrors in the 3450 Å wavelength region. *Appl. Opt.*, 1993, **32**(19) : 3541~ 3543
- [5] 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
- [6] 曹健林, 马月英, 张俊平等, 软 X 光激光用多层膜反射镜的制备与检测. *中国激光*, 1995, **22**(6) : 465 ~ 470
- [7] B. L. Henke, P. Lee, T. J. Tanaka *et al.*, Low energy X-ray interaction coefficients: photoabsorption, scattering, and reflection $E = 100 \sim 2000$ eV, $Z = 1 \sim 94$. *At. Data Nucl. Data Tables*, 1982, (**27**) : 1~ 82
- [8] T. W. Barbee, Multilayers for X-ray optics. *Proc. SPIE*, 1985, **563** : 2~ 28

Normal-Incidence Mo/B₄C Soft X-Ray Multilayer

Lu Junxia Ma Yueying Zhang Junping Cao Jianlin

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

(Received 21 July 1996; revised 11 April 1997)

Abstract The preliminary results of making Mo/B₄C multilayer mirrors at wavelength below 10.0 nm are presented. The multilayer structure was calculated at designed wavelength ($\lambda = 8.0$ nm), and the sample mirror were deposited by magnetron sputtering technique.

Key words soft X-ray, Mo/B₄C multilayer, normal incidence.