

# 软X光多层膜反射镜的研究

李 先 坤

**摘要:** 本文介绍了软X光多层膜反射镜的发展过程和应用前景。讨论了软X光多层膜计算的衍射动力学理论和薄膜光学理论。设计了周期和非周期多层膜系。用磁控溅射制备了171Å 21层周期和17层非周期Mo/Si结构反射镜。用电子束蒸发制备了256Å 21层周期Mo/Si结构反射镜。对所制样品进行了X光小角衍射实验, 俄歇电子能谱分析和反射率测试, 并对实验结果进行了一些讨论。

## 一、引 言

X光多层膜反射镜和色散元件的成功, 使X光光学近十年来有了飞速发展, 同时也将引起诸如空间物理学, 材料科学, 等离子体物理学, 微生物学等相关学科的飞跃。

早在二十年代, 人们就试图利用层状周期结构来获得X光反射元件, 但由于理论和技术的原因, 许多尝试均告失败。六十年代, Dinlage和Freirich做出了以Pb和Mg或Au和Mg的多层膜, 在几天内逐步退化, 但Fe和Mg的结构至少一年内是稳定的。1972年, Spiller提出了以高低吸收材料交替组合的近 $\lambda/4$ 膜系获得多层膜反射镜, 他本人成功地制得了多层膜结构。七十年代中期, Schoenborn和Saxena等用热源淀积技术制成了用于中子光学和中子偏振器的多层膜。1976年, Barbee和Keith用溅射技术制备了多层膜。

由于Spiller和Barbee等先行者们的开拓性工作, X光多层膜技术发展迅速。Ceglia在1988年报道说, 他的Mo/Si反射镜对133Å的正入射反射率已达60%。而Spiller在1989年报道说, 他的反射镜在波长45Å, 63Å, 114Å处的正入射反射率达5%, 14%和25%。正因为有了如此高反射率的正入射反射镜, X光光学系统及其它许多应用都得以付诸实施。多层膜反射技术已经或即将应用于高分辨率衍射光栅, 位相光栅, X光偏振仪, 双晶多层膜X光单色仪, X光全息系统, X光激光谐振腔, 软X光太阳摄谱仪, 大视场高分辨率正入射X光显微镜等等。

## 二、软X光多层膜理论

一般认为, 波长在10~300Å之间的电磁波称之为软X光。软X光与物质的相互作用可通过物质的光学常数来反映。通常, 可表示为

$$N = n - ik \quad (1)$$

式中 $N$ 为复折射率,  $n$ 为折射率, 其值通常接近且小于1,  $k$ 为吸收系数。

软X光通过介质时存在着比可见光大得多的吸收作用, 单一界面对软X光的反射率在

$10^{-6} \sim 10^{-7}$ 。所以,要实现软X光的反射,必须通过多个两种适当材料界面的反射叠加,即多层膜。

多层膜反射镜的反射率计算。概括起来有两大方法,即衍射动力学理论和薄膜光学理论。

### (1). 衍射动力学理论

对所研究波段,大多数物质的介电系数  $\epsilon$  满足  $|\epsilon - 1| \ll 1$ 。由衍射动力学理论,在周期性多层膜结构内可以建立起入射波与反射波的耦合波方程,这两个波是通过其相应介电系数的空间傅立叶分量作用。入射波和反射波的耦合波方程为

$$\begin{aligned} \frac{1}{dz} \frac{dE_+}{dz} - i \left( \frac{2l - \lambda}{\lambda} + \frac{1}{2} \delta_{\epsilon_0} \right) E_+ - i \frac{\delta_{\epsilon_+}}{2} E_- &= 0 \\ - \frac{1}{q} \frac{dE_-}{dz} - i \left( \frac{2l - \lambda}{\lambda} + \frac{1}{2} \delta_{\epsilon_0} \right) E_- - i \frac{\delta_{\epsilon_-}}{2} E_+ &= 0 \end{aligned} \quad (2)$$

式中  $l$  是多层膜的周期厚度,  $q = \pi/l$ 。

结合边界条件,求解以上方程得膜系振幅反射系数 ( $L$  为膜系总厚度)

$$r = \frac{-\alpha_- [1 - \exp(-2AL)]}{[1 + (1 - \alpha_+ \alpha_-)^{1/2}] - \exp(-2AL) [1 - (1 - \alpha_+ \alpha_-)^{1/2}]} \quad (3)$$

### (2). 薄膜光学理论

根据薄膜光学理论,由Fresnell反射系数递推出多层膜的反射率。

由Berning公式,前  $j$  层膜的振幅反射率为

$$R_j = [(R_{j-1} - r_j) \exp(-4\pi b_j d_j / \lambda)] \cdot \exp(-i4\pi a_j d_j / \lambda) + r_j \quad (4)$$

$(j = 1, 2, \dots, m)$

$r_j$  是第  $j$  层膜对真空的Fresnell反射系数。从第一层起进行迭代计算直到最后一层 ( $j = m$ ),进而求出整个膜系的反射率。

### 3. 优化设计

优化设计问题归纳为两点。其一是镀膜材料的优选;其二是给定工作条件下,决定膜系能达到的最大反射率与之对应的各层膜厚和层数。

材料选择从光学,物理,化学性质综合考虑。光学性质要求(1)吸收尽可能小;(2)而材料的Fresnell系数的差别尽可能大。物理和化学性质要求(1)能连续成膜,不扩散;(2)较好的热稳定性和抗辐射损伤能力。综合考虑的结果,被选用材料对有W/C, Ni/C, Mo/Si, W/Si, Mo/Al等。

周期膜系设计的基本思想:第一步,建立初始膜系。最简单的方法是求出四分之一波长膜系。或采用由衍射动力学方法得到的极值结果作初始膜系;第二步,建立评价函数。其形式为  $F(x) = \sum_{i=1}^m [R_0(\lambda_i) - R(x, \lambda_i)]^2$ , 式中  $x$  是设计参量(膜厚,层数),  $R_0$  目标反射率,  $R$  是  $\lambda_i$  处对特定  $x$  的反射率计算值;第三步,优化膜系。首先给定一周期数,求初始膜系的  $R_0$  和  $F_0$ , 然后固定  $d_1$ , 让  $d_2$  在一定范围搜寻,评价函数极小化,找出比值  $\beta = d_1/d_2$ 。再在  $\beta$  的附近作  $d_1$  和  $d_2$  的二维搜寻,评函数极小化。缩小步长,再作二维搜寻,求得参数  $d_1$  和  $d_2$ 。最后,固定  $d_1$  和  $d_2$ , 求出层数的优化值。

非周期膜系的设计基于复平面  $R_j$  曲线的光滑连接原则。该原则是增大反射最有效的方法是在  $R_j(d_j)$  曲线段与  $R_{j+1}(d_{j+1})$  曲线段的光滑连接总处更换材料以使振幅反射率向外扩

张。这样一层接着一层地进行更换材料达到一个最大反射率值。

### 三、制 备

1. 电子束蒸发(EBV)制备。我们用北仪产配有EQD-3型电子枪真空镀膜机制备了波长为256 Å 21层的 Mo/Si 反射镜样品三块。制备前, 两种材料膜厚通过台阶仪反复标定。膜厚用石英晶体振荡监控, 晶体头用循环水冷却。镀制过程适当增加沉积各层的间歇时间。

2. 磁控溅射(MCS)制备。还用北仪产JCK-500型直流磁控溅射装置制备了波长 171 Å 的21层周期和17层非周期样品各一块。膜厚用时间监控。

### 四、测 试

我们用日本理学株式会社产X光衍射仪对样品作了X光小角衍射实验。其中一块用电子枪蒸发制备样品的测试结果如图1。

我们还在沈阳金属所表面实验室做了样品的俄歇能谱分析实验。实验结果如图2。

此外, 我们在应光室测定了一块电子束蒸发制备样品的反射率。波长 250 Å, 入射角为 40°, 21层 Mo/Si反射镜。测得其反射率值为 10.4%。

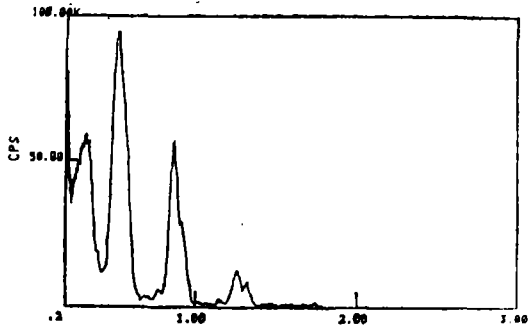


图 1

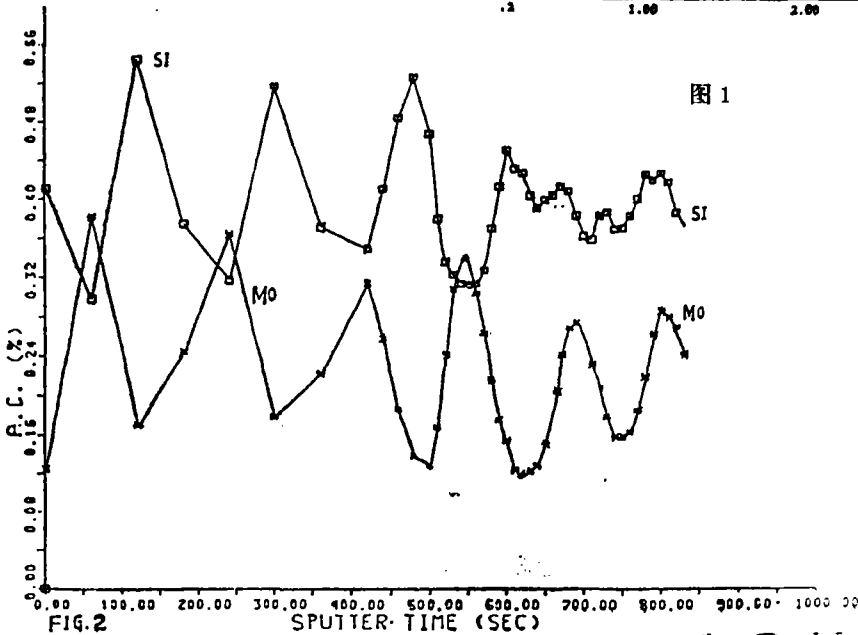


图 2

### 五、结 束 语

实验结果表明, 所制样品膜层界面清晰,

周期性好,基本实现了设计要求。为进一步提高反射率值,有必要在材料选择,制备技术,膜厚监控和测量技术等方面再作一些工作。

### 参 考 文 献

- [1] D.H.Berning, Physics of thin films, 1, Acadmic Press, New York(1963)
- [2] A.V.Vinogradov et al., Apu.Phs., 16, No.1(1977)
- [3] Masaki Yamamoto et al., SPIE, 1140, p448(1989)

## Resarch of Soft X-ray Multilayer Mirror

Li Xiankun

### Abstract

The paper describes the progress and the applied prospects of soft X-ray multilayer mirror. The period and nonperiod multilayer System are designed. In the wavelength  $171\text{\AA}$  21 layers period and 17 layers nonperiod Mo/Si mirrors are fabricated by DC MCS technique. In the wavelength  $256\text{\AA}$  21 layers period Mo/Si mirror is also fabricated by EBV technique. X-ray little angle diffraction experiment, AES analysis and reflectivity measurement are done to samples. Discussion of measurement results is given.