

18~ 20 nm 正入射宽带多层膜的研究*

柯常军¹ 王占山² 万重怡¹ 曹健林²

(¹中国科学院电子学研究所 北京 100080; ²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 采用随机数的方法在 18~ 20 nm 波段设计了积分反射率最大的宽带多层膜,理论上得到了高于周期膜系 8% 的积分反射率,同时带宽与视场范围有明显的展宽,并用磁控溅射法进行了初步制备。对反射率的相对测试表明,与周期膜系相比,非周期多层膜的带宽展宽,但峰值反射率略有降低。膜厚控制是实验的难点。

关键词 软 X 射线, 宽带多层膜, 磁控溅射

1 引 言

近年来,随着软 X 射线多层膜技术的深入发展,多层膜已成为软 X 射线天文望远镜、显微术、投影光刻、同步辐射等领域的重要光学元件。为在特定波长和入射角时获得最高反射率,这些多层膜通常采用周期结构,它具有光谱带宽窄和视场小的特点。但在某些应用中,多层膜的这种特性极为不利。特别是在某些带有多层膜的成像系统中,因为光通量的大小是成像质量好坏的关键。如采用同步辐射和激光等离子体等宽带光源的成像系统需要尽可能高的积分反射率(即光通量),来缩短成像时间,保证成像质量。在不便旋转镜面的天文装置中为满足从不同角度观察的要求,需要较大的视场,因此要求研制相应的宽带多层膜。

Nagel 等^[1]认为利用逐渐改变周期厚度的方法有可能提高带宽和扩大视场,Meekins 等^[2]进行了具体的计算,结果表明如果朝着基底方向依次增加周期厚度能扩展带宽,但峰值反射率有所下降。Vernon 等^[3]利用这种方法在 13~ 15 nm 波段制备了接近正入射的 Mo/Si 多层膜,这种多层膜与周期多层膜相比,积分反射率有 20% 的提高,峰值反射率有少许下降。

本文利用随机改变周期厚度的方法^[4]在 18~ 20 nm 波段设计了积分反射率最大的 Mo/Si 多层膜。并采用磁控溅射法完成了这种多层膜的初步制备,反射率相对测试表明制备的多层膜达到了预期的目标,可望在软 X 射线成像系统及光谱诊断系统中获得应用。

2 宽带多层膜性能模拟

以峰值反射波长为 19 nm,层数为 40 的 Mo/Si 周期多层膜 ($d_{\text{Mo}} = 3.10 \text{ nm}$, $d_{\text{Si}} = 6.78 \text{ nm}$) 为基础,在 18~ 20 nm 波段利用公式 $d_k^{\text{ran}} = d_k(1 + \sqrt{3} \Theta R_k)^{[4]}$ 随机改变周期厚度,式中

* 国家自然科学基金(编号: 69778026)资助项目。

收稿日期: 1999-06-20; 收到修改稿日期: 1999-08-23

的 R_k 是区间 $[-1, 1]$ 的均匀分布随机数, Θ 是随机因子, 最后得到积分反射率最大的正入射多层膜系, 最大的周期差达 2 nm。图 1 反映了多层膜的反射率与波长的关系, 宽带多层膜(实线)同周期多层膜(虚线)相比, 积分反射率有 8% 的提高, 带宽明显地展宽, 同时峰值反射率有所下降。

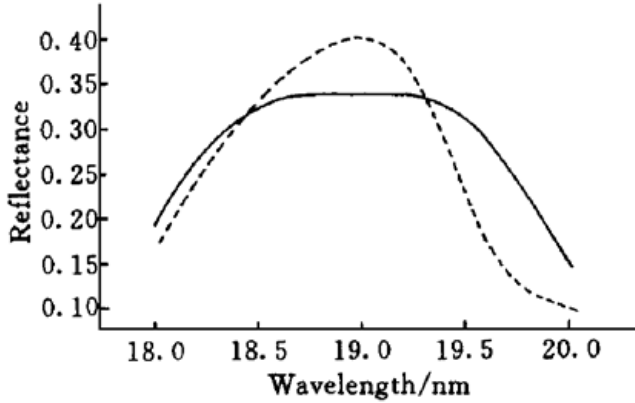


图 1 多层膜反射率随波长的变化

Fig. 1 Reflectance as a function of wavelength at normal incidence (solid curve) for disorder stack and (dashed curve) for periodic one

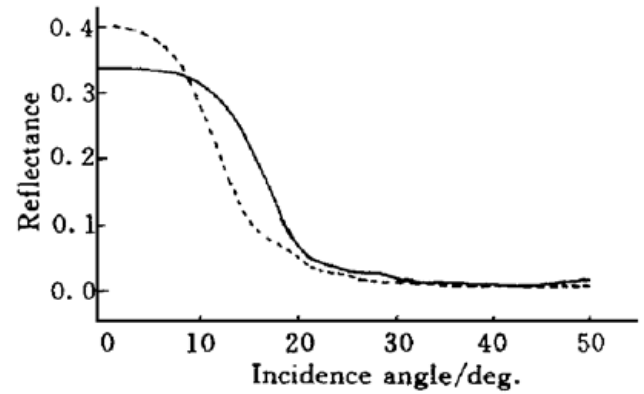


图 2 多层膜反射率随入射角的变化

Fig. 2 Reflectance as a function of incidence angle at $\lambda = 19$ nm (solid curve) for disorder stack and (dashed curve) for periodic one

假设以波长为 19 nm 的单色光入射, 可以得到多层膜反射率与入射角的关系, 如图 2 所示, 宽带膜系(实线)与周期膜系(虚线)相比, 反射率随入射角的变化相对较慢, 因而接收光的角范围也较大, 同时反射率峰值有所下降。这在天文学的应用上是非常有意义的, 例如在卫星光学系统的收集镜、单色仪的前置镜上, 要求入射角的范围越大越好。

3 宽带多层膜的制备与反射率的相对测试

由于宽带多层膜的每个周期厚度不相等, 因此并不是所有周期多层膜的制备方法都适合宽带多层膜。采取时间控制的磁控溅射法被认为是制备非周期多层膜的最佳方法^[3]。各层的镀膜时间由计算机严格控制, 制备时选取如下工作参数: Mo: 直流磁控溅射, 靶样品间距 15 cm, 工作气压 0.4 Pa, 功率 60 W。Si: 射频磁控溅射, 靶样品间距 8 cm, 工作气压 0.4 Pa, 功率 80 W, 得到的镀膜速率为 $V_{Mo} = 0.12$ nm/s, $V_{Si} = 0.07$ nm/s。在工作参数确定后, 我们在表面粗糙度均方根值小于 0.8 nm, $\phi 30$ mm 的 K9 玻璃片上制备了非周期宽带多层膜, 为了比较又制备了工作波长为 19 nm 的周期多层膜。

在所有的测试中, 最能反映多层膜制备水平的是工作波长下的反射率测量。在没有反射率测量装置的情况下, 我们以带有前置光学系统的大面积透射光栅光谱仪^[5]为基础, 建立了多层膜反射率定性测量装置。实验中, 让零级和+1 级的光经非周期多层膜反射, 而让-1 级光经周期多层膜反射, 这样便会在同一张胶片上获得周期多层膜和非周期多层膜反射率的分布。所采用的光源为激光等离子体, 激光打靶材料为钽, 这是因为钽的发射基本为连续谱, 十分便于反射率测量。考虑到靶材和实验效果, 选择的激光打靶参数为, 激光波长: 1.06 μ m, 脉冲能量: 600 mJ, 脉宽: 10 ns, 会聚激光斑尺寸约 100 μ m。胶片采用国产 SIOFM 型 X 射线胶片。图 3 为经多层膜反射后胶片接收到的图像, 其中最亮的像为零级反射光, 前后侧的暗线是激光打靶时

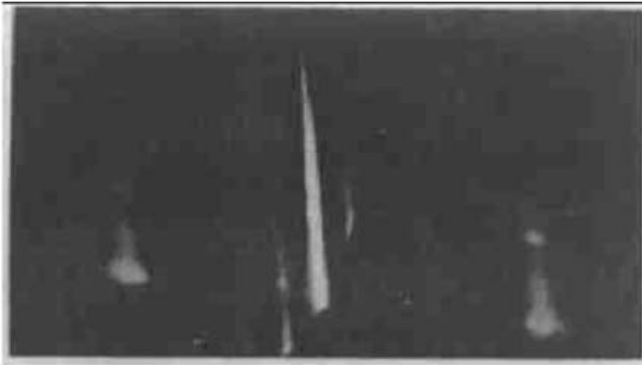


图3 用透射光栅谱仪测得的周期(右)和宽带(左)多层膜反射光谱

Fig. 3 Reflectance spectra obtained from periodic multilayer (right) and broadband one (left)

的杂散光形成的。左侧的像是由非周期宽带多层膜反射形成的,右侧的像是由周期多层膜反射形成的。由图可知非周期多层膜的带宽确实比周期多层膜的带宽要宽,但峰值反射率略有降低,这与设计结果符合得较好。

4 结 论

用磁控溅射法初步制备了 18~20 nm 正入射 Mo/Si 宽带多层膜。实验结果与理论计算符合较好,与周期多层膜相比,带宽展宽,视场扩大,同时反射率峰值下降。膜厚变化的无规律性使得

宽带多层膜的制备更加困难,要求的实验条件更严格,为了获得更高质量的宽带多层膜必须进一步提高膜厚控制精度。在进行反射率相对测量过程中,只要对胶片进行绝对标定完全可以进行反射率的绝对测量。测量精度由绝对标定的误差决定,这些内容需进一步研究。

参 考 文 献

- 1 D. J. Nagel, J. V. Gilfrich, T. W. Barbee. Bragg diffractors with graded-thickness multilayers. *Nucl. Instrum. Methods*, 1982, **195**: 63~ 65
- 2 J. F. Meekins, R. G. Cruddace, H. Gursky. Optimization of layered synthetic microstructures for narrowband reflectivity at soft X-ray and EUV wavelengths. *Appl. Opt.*, 1986, **25**: 2757~ 2763
- 3 S. P. Vernon, D. G. Stearns, R. S. Rosen. Chirped multilayer coatings for increased X-ray throughput. *Opt. Lett.*, 1993, **18**(9): 672~ 674
- 4 Ke Changjun, Wang ZhanShan, Zhang Tieqiang *et al.*. Numerical simulation of disorder soft X-ray multilayer for a maximum integrated reflectivity. *High Power Laser Particle Beam* (强激光与粒子束), 1999, **11**(1): 23~ 26 (in Chinese)
- 5 Wang Z. S., Wang Z., Chen B. *et al.*. Large area transmission grating spectrograph with high collecting efficiency and good spatial resolution. *SPIE*, 1998, **3443**: 137~ 142

Study on 18~20 nm Broadband Multilayer at Normal Incidence

Ke Changjun¹ Wang Zhanshan² Wan Chongyi¹ Cao Jianlin²

¹Institute of Electronics, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080

²Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Changchun 130022

Abstract In this paper, a better random method used for improving the light integrated reflectance in the 18~20 nm spectral region of a soft X-ray multilayer has been developed, a 8% increase in reflectance is obtained. The multilayer is fabricated by magnetron sputtering. The reflectance comparative measurement are used for testing the multilayer. The results demonstrate that the layer thickness disorder yields band broadening and wider view field with respect to periodic multilayer, but accompanied with a reduction in reflectance peak. Techniques of control layer thickness is the keystone of experiment.

Key words soft X-ray, broadband multilayer, magnetron sputtering