

# 北京同步辐射软 X 光反射率计装置 及其物理工作

崔明启 王 俊 廖建伟 黄宇营 唐鄂生 先鼎昌

(中国科学院高能物理研究所 北京 100039)

邵景鸿 薛 松 徐正良 孙剑辉

(中国科学院长春光学精密机械研究所 长春 130022)

1993-12-09 收稿

## 摘 要

介绍了安装在北京同步辐射装置上专门用于软 X 光多层膜研究的反射率计系统,给出了在该装置上测量得到的 Al 滤光片的软 X 光透射谱和 Nb/Si 多层膜的高角反射谱,用磁控溅射方法自制的 Nb/Si 多层膜样品在 17.59nm 附近得到的反射率为 32%。

**关键词** 同步辐射,反射率计,软 X 光多层膜,反射率。

## 1 引 言

随着高科技的蓬勃发展,软 X 光学应用日益广泛,软 X 光源、测试装置及软 X 光学材料及元件的研究引起许多国家的重视。为适应各种软 X 光学应用的需要,国际上新发展的软 X 光学材料及元件,如:软 X 光多层膜、波带片、多层膜光栅等近几年都取得相当大的进展,尤其软 X 光多层膜研究更是该学科主要研究对象之一。用软 X 光多层膜构成的软 X 光学系统,例如可观察活性生物样品的软 X 光显微术成像系统、用于超大规模集成电路研究的软 X 光掩膜缩小投影光刻系统等,均处于研究阶段<sup>[1,2]</sup>,三、五年内可望投入使用。同步辐射光源是唯一连续可调的软 X 光源,并由于它的高准直、高强度、完全偏振等优越特性,非常适合于进行各种软 X 光学方面的研究,因此各发达国家均在各自的同步辐射装置上建立了软 X 光多层膜测试装置。

鉴于多层膜应用的广阔前景,国内自八十年代初期就有人开展人工多层膜研究,至今已有十几家,但由于没有好的光源(如同步辐射光源)和好的测量系统(如反射率测量系统),一直难以使多层膜研究得到定量的评估,严重影响这方面研究的进展。为此,在北京同步辐射装置上研制了一套专门用于多层膜研究的反射率计系统。

## 2 装置简介

同步辐射软 X 光多层膜反射率装置已安装在北京同步辐射装置 3B1 束线上. 该装置由两台 Bragg 衍射仪构成双重二倍角复合机构, 第一衍射仪由单色器 ( $\theta_1$ ) 和随动摇臂 ( $2\theta_1$ , 样品台和探测器在其上) 组成, 第二衍射仪包括样品台 ( $\theta_2$ ) 和探测器 ( $2\theta_2$ ). 全套装置由柱面镜、单色器、样品台、探测器、真空系统、数据获取及控制系统等组成, 其光路如图 1 所示, 同步光以  $1.5^\circ$  掠入射经柱面镜 (M) 反射后到达单色器 ( $M_1$ ),  $M_1$  为人造多层膜色散元件,  $M_2$  为被测样品 (通常也是多层膜), D 为探测器,  $S_1$ 、 $S_2$  均为狭缝, F 为软 X 光滤色片. 单色器由入射狭缝  $S_1$ 、多层膜色散元件  $M_1$  和出射狭缝  $S_2$  构成, 被测样品  $M_2$  和探测器 D 构成反射率计. 由  $M_1$  将同步光色散成单色光入射到  $M_2$  上, 经  $M_2$  反射后到达探测器 D, 测得反射信号  $I$ , 将样品移出光路并用探测器直接接收单色光, 得到入射信号  $I_0$ , 从而得到样品在某一条件下的反射率  $R = I/I_0$ .

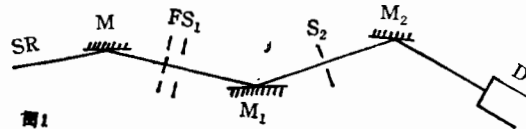


图 1 软 X 光反射率计光路图

该装置经精细调试后工作波段范围为  $4.5\text{nm}—20\text{nm}$ . 单色器转角范围  $3^\circ—70^\circ$  (该文所给角度均为 Bragg 角), 角分辨  $0.0075^\circ$ , 最大偏差  $2.94''$ , 随动摇臂转角范围  $6^\circ—140^\circ$ , 角分辨  $0.015^\circ$ . 样品台转角范围  $0^\circ—80^\circ$ , 角分辨  $0.01^\circ$ , 最大偏差  $2.74''$ , 探测器转角范围  $0^\circ—160^\circ$ , 角分辨  $0.02^\circ$ . 光束与光轴垂直夹角  $<0.1^\circ$ ,  $M_1$  和  $M_2$  平行度  $<0.1^\circ$ , 各镜面和转轴夹角  $<0.1^\circ$ .

## 3 物理实验方法及测试结果

在实验中采用两种工作模式: (1) 波长扫描法 ( $R-\lambda$  法), 多层膜样品和探测器固定在某一  $\theta$ 、 $2\theta$  角下, 驱动单色器作波长扫描, 测出多层膜反射率  $R$  随波长  $\lambda$  的变化, 从而得到多层膜在相应波长的反射率. 该方法也适合于透射样品, 透射样品置于与单色器出射光束垂直位置, 单色器与探测器直接构成  $\theta$ 、 $2\theta$  关系, 可测得某种材料在波长色散条件下的透射谱 (或吸收谱). (2) 角度扫描法 ( $R-\theta$  法), 单色器固定在某一出射波长  $\lambda$  (可选择若干不同点), 摇臂处于单色器固定入射角的  $2\theta$  位置, 样品和探测器从掠入射起始作  $\theta—2\theta$  扫描, 测得某一波长不同入射角下的反射率  $R$ . 必要时在峰值  $2\theta$  角附近做微区扫描, 由测量得到的 Rocking Curve 附近的点做三组抛物线拟合求平均计算得到精确的反射率, 该方法精度高, 也适合于软 X 光光学常数的测量.

图 2 给出 Al 透射谱曲线, 样品为 Al 膜 (厚度约  $300\text{nm}$ ), 前置滤光片与样品相同, 单色器为 Mo/Si 多层膜 (周期厚度  $d = 11.09\text{nm}$ , 周期数  $N = 30.5$ , 长春光机所研制), 扫描范围  $3^\circ—70^\circ$ , 对应波长  $12.4—20\text{nm}$ , 由于受前置滤光片限制, 在该波段范围仅  $17.3\text{nm}$  以上波长能够透过 (如图 3 所示). 从图 2 中可以看到, 透射谱起始峰位在  $57^\circ$ , 对应

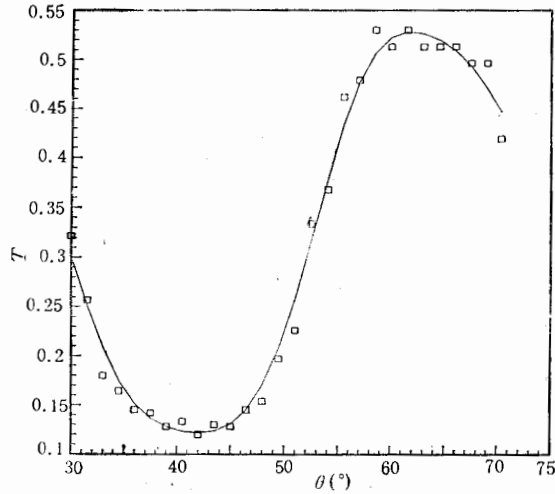


图2 Al膜(300nm)透射谱实测曲线  
 $T$ 为透过率,  $\theta$ 为单色器入射角度

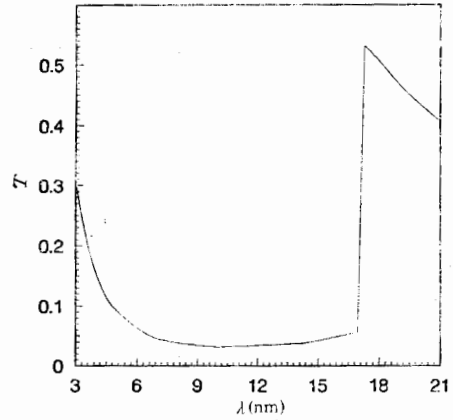


图3 Al膜(300nm)透射谱理论计算曲线  
 $T$ 为透过率,  $\lambda$ 为入射波长

的单色器波长为 17.3nm, 与图 3 理论计算结果一致, 实测透过率与理论计算值也基本一致。而谱的形状不一致的原因, 据分析一是由于 Mo/Si 单色器在长波段的全反射角致使短波段透射谱下降沿展宽, 二是由于多层膜单色器能量分辨不高而引起长波透射谱上升沿不够尖锐。

图 4 给出的是波长扫描结果, 样品是用射频磁控溅射方法制备的 Nb/Si 多层膜 (周期厚度  $d = 13.45\text{nm}$ , 周期数  $N = 20.5$ )。测试条件与透射测量相同, 单色器扫描范围  $45^\circ - 70^\circ$ , 对应波长 14.7—19.1nm, 样品固定在  $42^\circ$  入射角。图中看出在单色器入射角

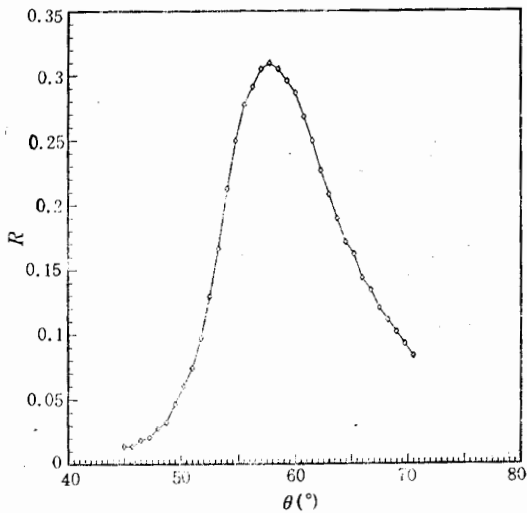


图4 Nb/Si 多层膜样品波长扫描测量结果  
 $R$ 为反射率,  $\theta$ 为单色器入射角度

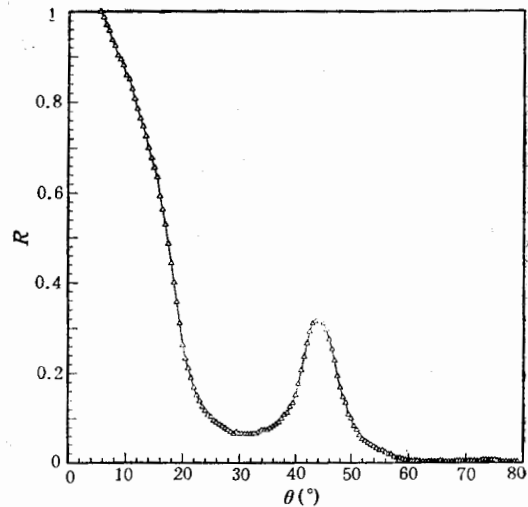


图5 Nb/Si 多层膜样品角度扫描测试结果  
 $R$ 为反射率,  $\theta$ 为样品入射角度

60°(对应出射波长为 17.59nm) 时多层膜样品的反射率为 32%。

图 5 给出了角度扫描结果, 样品与测试条件均同于波长扫描, 单色器固定出射波长为 17.59nm, 样品  $\theta$  角扫描范围 0—80°, 在  $\theta = 42^\circ$  时, 也出现与波长扫描相同的 32% 的反射峰。反射率测试结果详细分析见另文<sup>[3]</sup>。

用上述 Nb/Si 样品作为单色器装在反射率计上, 对原单色器进行了测量, 角度扫描结果如图 6 所示。测试条件均同上, 单色器固定出射波长 17.9nm, 其反射率仅 10% 左右, 该单色器 (Mo/Si 多层膜) 在日本测试结果为 14%<sup>[4]</sup>, 后因长期辐射反射率有所下降。并用 Nb/Si 单色器为中国工程物理研究院对软 X 光探测器及 X 光胶片进行了软 X 波段定标测量, 均取得预期结果。

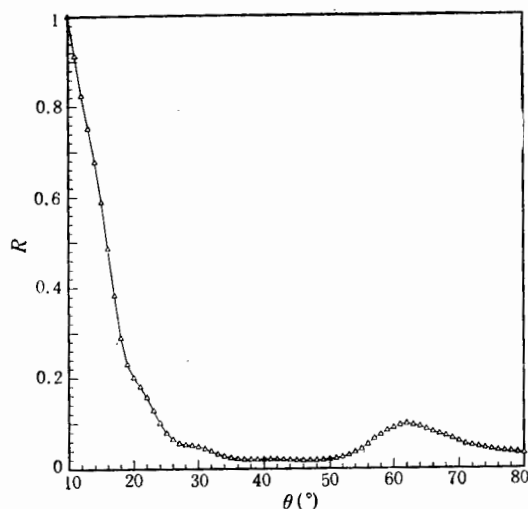


图 6 Mo/Si 多层膜样品角度扫描测试结果

## 4 结 论

1. 该装置结构新颖, 采用软 X 光多层膜作单色器提高了同步辐射光的反射效率, 为精简系统结构、缩小体积创造了条件, 在保证精度的基础上降低了工程造价。集单色器、反射率计于一体构成的统一的双重二倍角复合机构, 给调试和测量带来很大方便, 也便于开展更多的软 X 射线方面的研究工作。

2. 测量结果表明, 用磁控溅射方法制备的 Nb/Si 多层膜在软 X 波段高角状态下达到 32% 的高反射率, 在相同波段范围其反射率优于原单色器 (Mo/Si) 三倍。在同步辐射反射率计装置上作为单色器使用, 已达到实用结果。进一步证明了我们已初步具备研制高性能软 X 光多层膜的能力。

作者感谢中国科学院长春光机所曹建林小组和李懋廉小组分别为本工作研制了多层膜单色器和软 X 光滤光片, 并感谢高能所同步辐射室吴坚武同志在同步辐射光束调试中

给予的帮助。

### 参 考 文 献

- [1] E. Spiller et al., *Optical Engineering*, Vol. 30 (1991) 1008.
- [2] Jon M. Slaughter and Charles M. Falca, NIM A319(1992) 63.
- [3] 崔明启 缪建伟等, 多层膜反射率研究初探, 第一次两岸同步辐射学术研讨会论文集, 北京(1993.10.), p360.
- [4] J. L. Cao, The Current Studies of Soft X-ray Multilayer in CIOM, Proc. of the Sino-Japan-Symposium on Engineering Optics Beijing (1992. 10), p193.

## New Soft X-Ray Reflectometer on Beijing Synchrotron Radiation Facility and Some Basic Results of Physics Work

Cui Mingqi    Wang Jun    Miao Jianwei    Huang Yuying  
Tang Esheng    Xian Dingchang

(Institute of High Energy Physics, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039)

Shao Jinghong    Xue Song    Xu Zhengliang    Sun Jianhui

(Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica, Changchun 130022)

Received 9 December 1993

### Abstract

This paper describes the new soft X-ray reflectometer with multilayer monochromator on beam line 3B1 of Beijing Synchrotron Radiation Facility (BSRF). The transmitted spectrum of aluminum filter and reflected spectrum of Nb/Si multilayer in soft X-ray region have been analysed with this reflectometer. The reflectivity of a Nb/Si multilayer manufactured in our group (41 layers,  $d = 13.45$  and wavelength near 17.59nm at 42 deg.) has been measured to be 32%.

**Key words** synchrotron radiation, soft X-ray reflectometer, multilayer, reflectivity.