

软X射线—真空紫外反射率计

陈 波 马 玲 李福田

摘要: 软X射线—真空紫外反射率计系统由光源、单色仪、反射率计、电子学及微机控制系统等几部分组成。可完成各种光学镜面、光栅、成像系统等的性能评价工作, 反射率计真空室直径 $\phi 800\text{mm}$, 长 1200mm , 工作波段 $25\sim 100\text{nm}$, 更换光源和探测器可扩展到 $1\sim 250\text{nm}$, 角分辨率 0.03° , 扫描范围 $0\sim 90^\circ$ 。

一、引 言

近二十年来, 随着空间光学、等离子体物理、生命科学和受控核聚变、X射线激光、X射线光刻、X射线显微术等新学科和高技术的发展, 软X射线-真空紫外波段光学研究异常活跃。各种高反射率的软X射线多层膜反射镜、反射光栅、透射光栅相继问世, 并已在许多科学领域得到广泛应用。许多国家建立起了软X射线-真空紫外光学测试、评价系统^[1,2], 以完成软X射线-真空紫外波段光学元器件的性能评价及标定工作。真空紫外光学测试、评价系统依照使用光源不同分为同步辐射型和非同步辐射型, 同步辐射波段范围宽、强度大、稳定性好, 但其造价昂贵、操作复杂、使用不便限制了它的广泛应用。为此国际上一些先进的研究机构, 如美国Colorado大学空间天文研究中心^[3]、日本东北大学计测研究所、美国加州

大学空间科学实验室^[4]、NASA等先后开展了研究工作, 建立了一系列非同步辐射型软X射线-真空紫外性能评价系统。我国自七十年代末开展软X射线-真空紫外波段光学研究以来, 软X射线-真空紫外光学发展非常迅速, 现已初步建立起光源、探测系统、多层膜元件、X射线光刻、X射线成像光学、X射线激光器、高温等离子体诊断等研究体系。为满足国内软X射线-真空紫外波段研究的需要, 我们建立了一套高精度软X射线-真空紫外光学性能评价系统, 并开展了软X射线多层膜镜面反射率、光栅效率及薄膜光学常数研究工作。

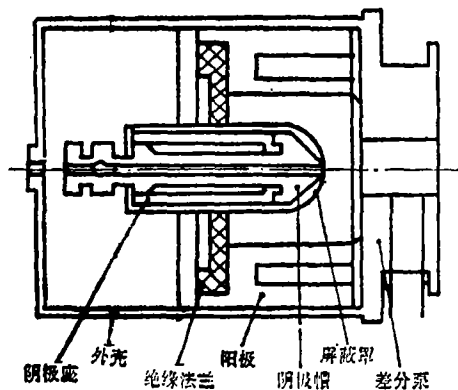


图1 光源结构简图

二、软X射线-真空紫外反射率计系统

1. 光源

目前这套系统采用空心阴极光源^[5], 如图1示。光源由空心阴极、筒状阳极、差分室组

成，阴极由机械加工性能较好，溅射率低的铜钨合金制成，筒状阳极由纯铝制成，阴极外装有直径 $\phi 28\text{mm}$ 石英屏蔽罩，阻止阴极、阳极间侧向直接放电，阴阳极间由高绝缘性能的聚四氟乙烯绝缘，并且阴阳极均采用双壁水冷方式冷却，以保证该光源能在较大的工作电流下长期稳定工作。空阴极光源一般在 10^{-1}Torr 下工作，而真空紫外测试系统一般要在 10^{-4}Torr 下工作，为了解决从低真空向高真空过渡，在光源与仪器间加一级差分泵系统，这样在光源前不需加任何窗口就很好地解决了从低真空向高真空的过渡，同时也有效地利用了光源的光谱辐射。

空阴极光源，能在 $20\sim 250\text{nm}$ 波段产生丰富的原子、离子谱线，如图2示其光谱辐射稳定性好于 $\pm 1\%/h$ 、光源最大工作电流 400mA ，工作电压 2kV 。

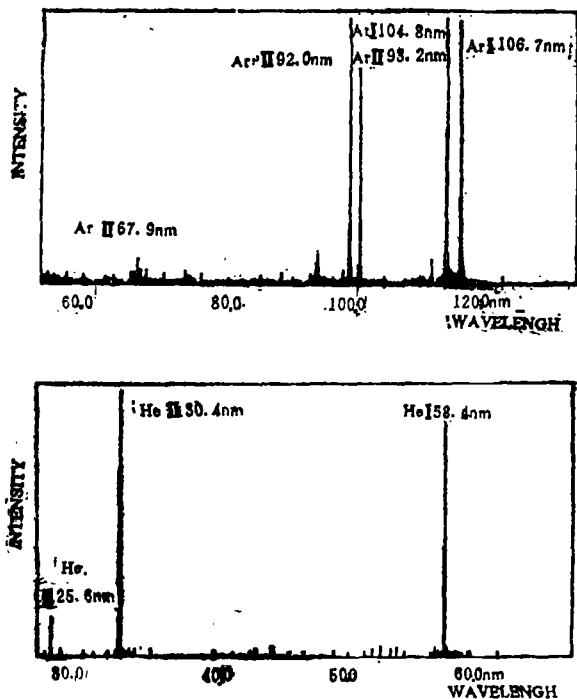


图2 光谱分布图

2. 单色仪

软X射线-真空紫外反射率计系统分光仪器为McPherson247软X射线-真空紫外凹面光栅掠入射单色仪，所用光栅曲率半径 2.2m ，入缝、出缝、光栅分别在半径 1.1m 罗兰圆上，通过狭缝在罗兰圆上的运动完成光谱扫描过程，该单色仪可调换不同刻线密度的光栅，在 $1\sim 250\text{nm}$ 波段工作，当用 300线/mm 光栅时，分辨率 0.03nm ； 600线/mm 时，分辨率 0.015nm ； 1200线/mm 时，分辨率 0.008nm 。光栅入射角可在 $82^\circ\sim 88^\circ$ 间变换，每档间隔 0.5° 。

3. 反射率计

反射率计由主真空室、五自由度转台、光电探测器组成，如图3示。其中主真空室直径 $\phi 800\text{mm}$ ，长 1200mm ，真空度 10^{-6}Torr 。转台可同时完成三维平动和二维转动，全部运动过程由微机控制的五台真空步进电机完成。为达到较高的角分辨率，探测器臂长选为 600mm 。五自由度转台设计指标如表1示。

在测试过程中由于探测器和样品都要转动，这样平动和不同心度误差都会引起角分辨率

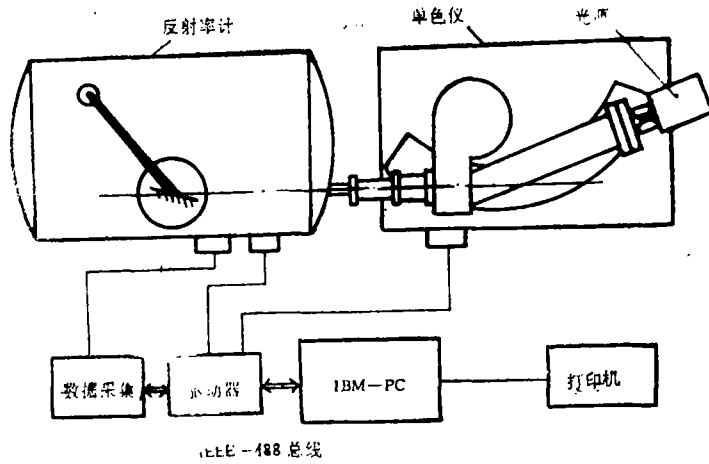


图3 反射率计系统示意图

表1 五自由度转台主要技术指标

| | 行程 | 精度 | 分辨率 |
|--------------|-------------------|---------------------|------------------|
| x 轴 | 20 ~ -60mm | $\pm 10\mu\text{m}$ | 10 μm |
| y 轴 | $\pm 50\text{mm}$ | $\pm 10\mu\text{m}$ | 10 μm |
| z 轴 | $\pm 60\text{mm}$ | $\pm 10\mu\text{m}$ | 10 μm |
| θ 角 | 0 ~ 90° | 5' | 1' |
| 2 θ 角 | $\pm 90^\circ$ | 5' | 1' |

探测器抖动量 $\leq 0.1\text{mm}$; 转动同心度 $\leq \pm 10\mu\text{m}$

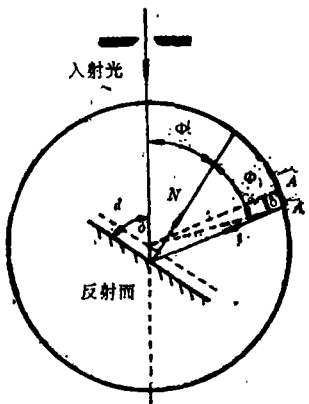


图4 反射率计光路图

和角度精度的降低。图4表明因转动引起的角度偏差。

图中 d ——探测器转动中心和样品转动中心偏差； ϕ ——样品转角； l ——探测器臂长， δ' ——转角误差。

由 $\delta' = (2d/l)\sin\phi$ 可求出由于转动和平动引起的角度偏差。

据表1给出的转台技术指标可求得：

$$d = \sqrt{(0.01)^2 + (0.01)^2 + (0.01)^2 + (0.01)^2}$$

$$l = 600$$

令 $\phi = 90^\circ$ 则 $\delta' = 0.004^\circ$ ，此外由探测器抖动引起的角度偏差 0.01° ，蜗轮副本的角度

误差 0.017° 。由以上三种误差之和引起系统总的角分辨率误差 δ 为

$$\delta = 0.017^\circ + 0.004^\circ + 0.01^\circ = 0.03^\circ$$

在反射特性研究中，一般每隔 1° 采集一个数据即可满足高精度反射率测试及光学常数研究需要，所以 0.03° 分辨率可以达到 $\pm 1.5\%$ 角度相对测量精度。而光源、探测器等全部测试

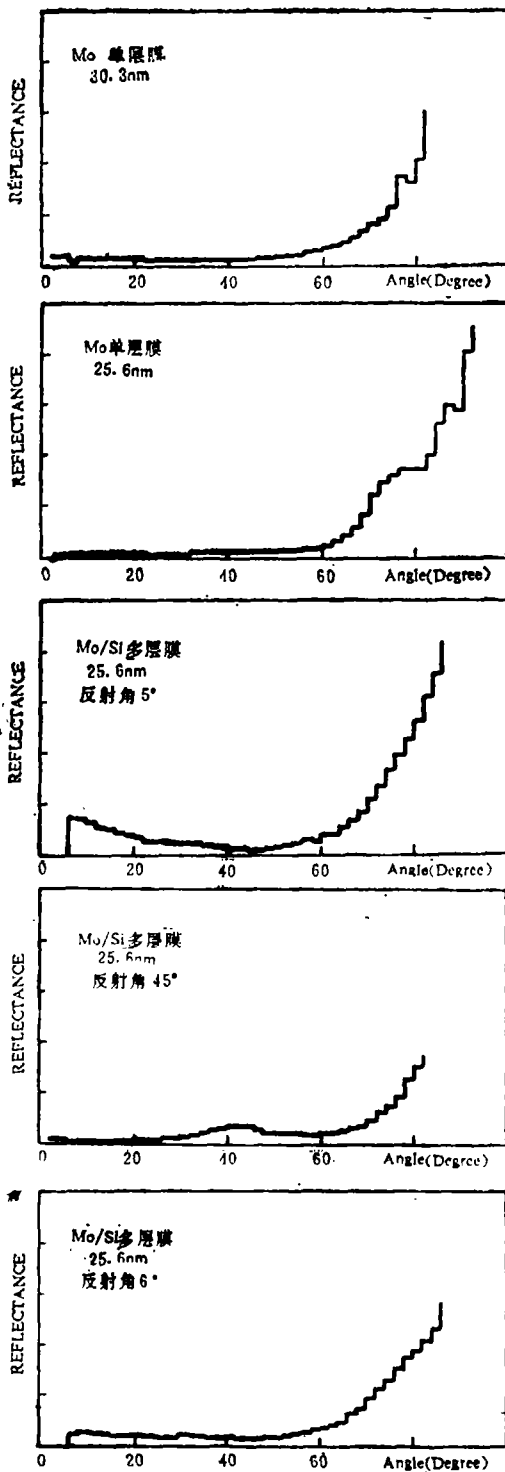


图5 测试结果图

系统的相对稳定性为 $\pm 1\%$ ，因此角分辨率恰好与系统的稳定性相匹配。

在25nm~100nm波段反射率计采用通道电子倍增器(CEM)作为光电转换器件，电信号经前级放大器放大后进入主放大器，最终经IEEE-488标准接口传送给PC机进行存贮、处理、打印结果。

4. 微机控制系统

全部波长扫描、角度扫描、样品平动及数据采集均由一台PC机控制完成。测试系统可在微机控制下完成如下几项工作
①角度、波长扫描；②角度、波长寻峰；③特定波长、角度扫描；④结果存贮、打印、绘图。

三、测试结果

我们利用所研制的软X射线-真空紫外反射率计系统，对Mo/Si多层膜反射镜反射率进行了大量的测试、研究，给出多层膜反射镜反射率随角度的变化关系，测出峰值反射率反射角如图5示。用曲线拟合法计算了Mo、Si薄膜材料光学常数，取得了有价值的实验结果。所用的多层膜样品和单层样品由九室和应光室提供。

参 考 文 献

- [1] W. R. Hunter, Applied Optics, 6, No. 12, 1967 2140
- [2] D. L. Windt and R. C. Catura, SPIE, 984, 1988 82
- [3] David L. Windt and Webster Cash, SPIE, 689, 1986, 167
- [4] Stan Mrowka et al., SPIE, 689, 1986, 108
- [5] 陈波, 光学机械, 1989, 第6期

Soft X-ray and VUV Reflectometer

Chen Bo Ma Ling Li Futian

Abstract

Soft X-ray and VUV reflectometer system consists of VUV source, monochromator, reflectometer, electronics unit and microcomputer. The evaluation of optical mirrors, gratings and image system can be completed by this system. The vacuum chamber of the reflectometer is 800 mm in diameter by 1200mm in length. The system can be operated from 25 nm to 100 nm. The sample stage permits rotation with respect to incident beam with resolution of 0.03 degree and a travel range extending between 0 and 90 degree.