

文章编号 1004-924X(2008)10-1886-05

小型高精度软 X 射线-极紫外反射率计

尼启良,刘世界,陈 波

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 应用光学国家重点实验室,吉林 长春 130033)

摘要:针对探月二期工程中的有效载荷之一极紫外相机中的多层膜光学元件反射率测量的需要,搭建了一台使用液体靶激光等离子体光源的小型软 X 射线-极紫外波段反射率计。该反射率计主要由激光等离子体光源、Mcpherson 247 动狭缝掠入射单色仪及相关的数据采集系统组成。单色仪工作波段为 1~125 nm,光谱分辨率 <0.08 nm。无碎屑的液体靶激光等离子体光源的使用避免了光学元件的损坏,而动狭缝掠入射单色仪的使用则提高了光谱分辨率和波段范围。使用该反射率计实测了工作波长为 13.5 nm 和 30.4 nm 的 Mo/Si 多层膜的反射率,测量结果表明测量重复性优于 $\pm 0.5\%$,实现了对多层膜反射率的高精度测量。

关键词:软 X 射线-极紫外反射率计;多层膜;液体靶激光等离子体光源

中图分类号: O434.12 **文献标识码:** A

Compact high-precision soft X-ray and extreme ultraviolet reflectometer

NI Qi-liang, LIU Shi-jie, CHEN Bo

(*State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China*)

Abstract: A compact soft X-ray and Extreme Ultraviolet (EUV) reflectometer system using a Laser Produced Plasma (LPP) light source with liquid-jet target was developed to use in high-precision reflectance measurement of multilayer mirrors in an EUV imager for a payload of CHANGE project. This reflectometer is mainly composed of a LPP light source, a Mcpherson 247 type grazing-incidence monochromator with moving exit slit and a correlative data collection system. The wavelength range of monochromator is 1~125 nm and the spectral resolution is less than 0.08 nm. Compared with metal target LPP source, this reflectometer can avoid destroying optical elements near the light source by using debris-free liquid-jet target, and can improve both wavelength range and spectral resolution by using grazing-incidence monochromator with moving exit slit. At the same time, the reflectances of Mo/Si multilayer coating at central wavelength of 13.5 nm and 30.4 nm were measured, the results show the repeatability of the reflectance measurement is better than $\pm 0.5\%$, which proves that the reflectometer can take high-precision reflectance measurements for multilayer coating mirrors.

收稿日期:2007-11-01;修订日期:2008-06-30.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 40774098)

Key words: soft X-ray and extreme ultraviolet reflectometer; multilayer coating; liquid-target Laser Produced Plasma(LPP) source

1 引言

目前极紫外相机已成为探月二期工程中的有效载荷之一,此相机用于拍摄地球等离子体层发射的 30.4 nm 波长的图像。相机使用的光学元件是一工作波长为 30.4 nm 球面多层膜反射镜,因此,高精度地测量极紫外多层膜反射镜的正入射反射率成为必须解决的问题。要实现多层膜反射率高精度测量,需要满足下面条件:首先,使用高光谱分辨率的单色仪作为分光元件,保证在多层膜很窄的带宽内实现多点测量;其次,稳定而洁净的光源,避免对被测样品的污染;第三,具有较高信噪比的光电转换系统;第四,高精度的多层膜样品平移和转动机构。迄今为止,大部分软 X 射线-极紫外多层膜反射镜正入射反射率的测量主要使用同步辐射作光源的反射率计^[1-2],这是因为同步辐射能够产生连续的、具有很高平均亮度的和稳定性的单色软 X 射线辐射。但是在国内仅有一台使用同步辐射的软 X 射线反射率计,建在北京^[3-4],远离软 X 射线镀膜车间或实验室,使多层膜反射率的测量及其结构的优化很不方便。与同步辐射相比,激光等离子体光源小型、廉价、便于维修和使用,对于软 X 射线镀膜车间或实验室,建立这样的反射率计远比建立同步辐射反射率计容易得多。本实验室建立了这样的软 X 射线反射率计并已投入使用^[5]。与世界上已建立起来的所有此类反射率计^[6-7]一样,它使用结构复杂的具有固定入射和出射狭缝的掠入射单色仪作为分光 and 波长选择元件,以多块掠入射球面反射镜为聚光元件,并使用金属靶的激光等离子体光源。其缺点是光谱分辨率低、波段范围窄,光源产生的辐射到达探测器时已很微弱,降低了光电转换系统的信噪比。此外,金属靶激光等离子体光源产生的碎屑也会损坏其附近的光学元件。为了克服上述缺点,本项目组基于 Mcpherson 247 动狭缝掠入射单色仪和液体靶激光等离子体光源建立了一台新的小型高精度反射计,其 Mcpherson 247 动狭缝掠入射单色仪只有一个光学元件即球面光栅作为分光和聚光元件,这既提高了光谱分辨率

和波段范围,又增加了到达探测器的能量,提高了探测系统的信噪比。同时,液体靶激光等离子体光源的使用还避免了光学元件的污染。

2 反射率计结构及多层膜反射率测量方法

反射率计的结构如图 1 所示,它由液体微滴喷射靶激光等离子体光源、Mcpherson 247 掠入射单色仪、样品室、真空系统、光电探测电路和计算机控制软件等几个部分组成。Mcpherson 247 的入射角为 88° 时,工作波段为 1~125 nm,入射狭缝宽度为 100 μm 时,光谱分辨率 < 0.08 nm。入射到多层膜样品上的光束是直径为 1 mm 的圆光束,被测多层膜样品的最大尺寸是 60 mm \times 60 mm \times 60 mm ($L \times W \times H$),样品台的平移精度为 5 μm ,转动精度为 0.005° 。

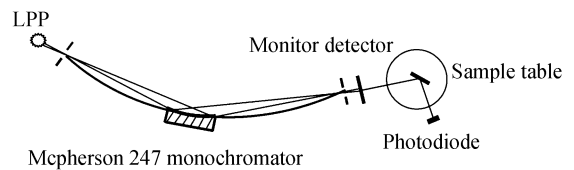


图 1 反射率计的结构简图

Fig. 1 Schematic diagram of soft X-ray reflectometer

2.1 液体微滴喷射靶 LPP 光源的工作原理及结构

所设计和研制的液体微滴喷射靶 LPP 光源由一个可连续控温的电磁喷气阀、YAG 激光器、信号脉冲发生器和气体收集器组成,其工作原理和结构如图 2 所示。由信号发生器产生的 3 个脉冲按照一定的时序分别触发激光器的 Xe 灯、Q-开关和电磁阀,使激光束正好聚焦在阀门喷出的液体微滴上,产生辐射软 X 射线的激光等离子体。选取美国通用阀公司的系列 99 型电磁喷气阀门作为制冷对象,这种阀门可使用任何无腐蚀性的流体,其阀体使用金属密封,在极低的温度下流体的漏率 $< 1 \times 10^{-8}$ cm^3/s 。使用液氮作制冷剂可以把阀门制冷到足够低的温度。工作时液氮

不间断地流过缠绕在阀体外部直径为 3 mm 的螺旋状铜管, 阀门的温度会逐渐地降低并趋近液氮的温度。因铜具有良好的导热性, 所以在阀体和铜管之间夹了一层厚度 2 mm 的金属铜来提高制冷速度。一个铂温度计被安装在铜层内, 用来测量整个阀体的温度, 控温仪可以显示这一温度。为了获得所需的工作温度, 在铜管的外面缠绕了钨丝作为加热器, 加热器根据控温仪设定的温度自动地加热阀门使之接近设定的温度。适当地控制液氮的流量, 阀门的温度就会固定在设定的温度。控温范围 77~473 K, 控温精度 0.2 K。在激光焦点处的功率密度为 $8 \times 10^{12} \text{ W/cm}^2$ 的条件下, 氙气和氩气在软 X 射线-极紫外波段会产生很强的辐射^[8], 可用于多层膜的反射率测量。

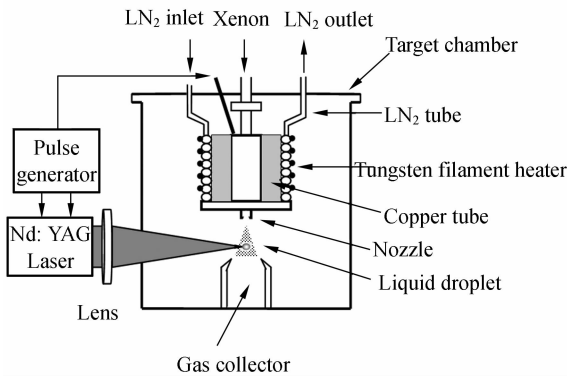


图 2 液体微滴喷射靶 LPP 光源的工作原理及结构图
Fig. 2 Structural and operating principle illustration of liquid aerosol jet LPP source

2.2 多层膜反射率测量方法

通过扫描波长可以测量某一正入射角的反射率随波长变化的曲线; 也可以固定在某一波长, 测量在该波长处反射率随入射角变化的曲线, 入射角为 $5 \sim 90^\circ$ 。

在测量软 X 射线-极紫外多层膜样品的反射率时, 为了消除光源的不稳定性, 可将同一入射光束分为两部分, 同时使用两个探测器探测这两部分光的强度。一个探测器位于样品室的入口, 固定不动, 该探测器中心具有直径为 1 mm 的孔, 一部分光可透过这个孔, 称为监控探测器; 另一个探测器位于样品台上, 用来测量同一光束透过监控探测器中心孔的光强度或这部分光束从样品上反射后的光强度, 称为主探测器。在测量反射光时主探测器转动的角度总是样品所转动角度的二

倍, 即主探测器的转角与样品的转角总是二倍的关系。在测量过程中, 首先, 将样品从光路中移开, 记录下入射光被监控探测器测量的信号 I_{RM} 和主探测器测量的信号 I_R , 并使用 I_{RM} 归一化 I_R 来消除光源的不稳定性, 即二者的比值 I_R/I_{RM} 对于光源来说是稳定的, I_R/I_{RM} 可以看作入射光信号。然后, 将被测样品移入光路, 记录下入射光束被监控探测器测量的信号 I_{SM} 及光束上部分被样品反射后主探测器测量的信号 I_S , 同样使用 I_{SM} 来归一化 I_S , 即 I_S/I_{SM} 可以看作反射光信号。在某一波长的反射率为:

$$R(\lambda) = \frac{I_S(\lambda)/I_{SM}(\lambda)}{I_R(\lambda)/I_{RM}(\lambda)} \quad (1)$$

图 3 给出了探测电路的示意图。监控探测器和主探测器使用的是 IRD AXUVPS1F 和 IRD AXUV-100。IRD AXUVPS1F 中心有一小孔, 一

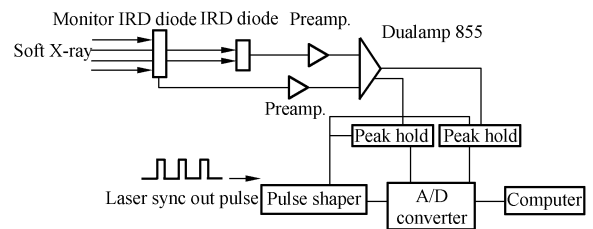


图 3 探测电路示意图

Fig. 3 Detection electronic circuit diagram

部分来自光源的光被其探测, 另一部分通过小孔入射到样品上, 经反射被 AXUV-100 探测。由它们将入射的光脉冲信号变成电脉冲电信号, 两个电荷灵敏前置放大器被分别用于放大这两个电脉

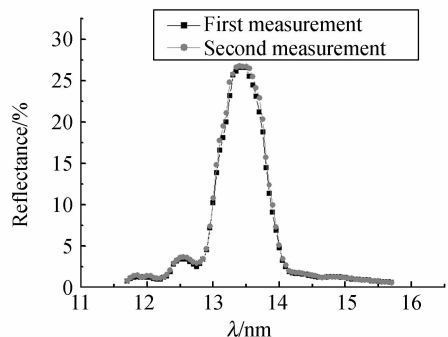


图 4 13.5 nm 多层膜正入射反射率-波长曲线
Fig. 4 Normal incident reflectance vs wavelength for Mo/Si multilayer coating at center wavelength of 13.5 nm

冲信号,为了进一步放大这两个信号并对其滤波,这里选择了一个 ORTEC 公司的 855 型非线性放大器。峰值探测器的作用是将 855 输出脉冲的峰值保持几十 μs 的时间,以便于 A/D 数据采集卡能有足够的时间将这一峰值采集下来。使用的 A/D 模数转换器是 National Instruments 公司的 6023E,它具有 12 位转换精度,能够满足高精度

的测量要求,具体测量方法见参考文献[9-11]。

图 4 和图 5 给出了测量的 Mo/Si 多层膜正入射反射率随波长变化的曲线,正入射角均是 6° 。图 4 的 Mo/Si 多层膜的工作波长是 17.1 nm,40 层多层膜。图 5 的 Mo/Si 多层膜的工作波长是 30.4 nm,40 层多层膜。测量结果表明测量重复性优于 $\pm 0.5\%$ 。

3 结 论

基于高光谱分辨率的 Mcpherson 动狭缝掠入射软 X 射线-极紫外单色仪,建立了一台小型的高精度软 X 射线-极紫外反射率计。该反射率计以液体靶激光等离子体为光源,克服了金属靶激光等离子体光源产生金属碎屑的缺点,可以长期连续运行。实测了工作波长为 13.5 nm 和 30.4 nm 多层膜的反射率,测量结果表明,反射率测量重复性优于 $\pm 0.5\%$ 。

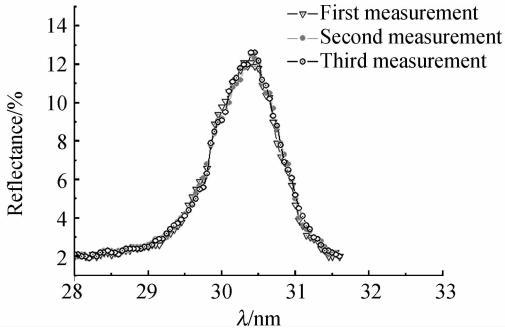


图 5 30.4 nm 多层膜正入射反射率-波长曲线

Fig. 5 Normal incident reflectance vs wavelength for Mo/Si multilayer coating at center wavelength of 30.4 nm

参考文献:

- [1] UDERWOOD J H, GULLIKSON E M, KOIKE M, *et al.*. Calibration and standards beamline 6. 3. 2 at the advanced light source[J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 1996, 67(9):3372.
- [2] FUCHS D, KRUMREY M, MULLER P, *et al.*. High precision soft X-ray reflectometer[J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 1995, 66(2):2248-2250.
- [3] 薛松,邵景鸿.同步辐射软 X 射线多层膜反射率计的设计[J]. *光学精密工程*, 1994, 2(3):85-88.
XUE S, SHAO J H. Design of soft X-ray synchrotron radiation multilayer reflectometer [J]. *Opt. Precision Eng.*, 1994, 2(3):85-88. (in Chinese)
- [4] 薛松,邵景鸿,徐正良,等.同步辐射软 X 射线多层膜分光反射率测试装置[J]. *光学精密工程*, 1993, 1(3):24-28.
XUE S, SHAO J H, XU ZH L, *et al.*. Reflectivity-measuring equipment for soft X-ray synchrotron radiation using a multilayer dispersing [J]. *Opt. Precision Eng.*, 1993, 1(3):24-28. (in Chinese)
- [5] 陈波,尼启良,曹继红.激光等离子体光源软 X 射线反射率计[J]. *光谱学与光谱分析*, 2005, 25(3):453-455.
CHEN B, NI Q L, CAO J H. Soft X-ray reflectometer with laser produced plasma source[J]. *Spectroscopy and Spectrum Analysis*, 2005, 25(3):453-455. (in Chinese)
- [6] TRAIL J A, BYER R L. Measurement of soft X-ray multilayer mirror reflectance at normal incidence using laser-produced plasma[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1988, 52(4):269-271.
- [7] WINDT D L, WASKIEWICZ W K. Soft X-ray reflectometry of multilayer coatings using a laser-plasma source[J]. *SPIE*, 1991, 1547:144-158.
- [8] 尼启良. Xe 液体微滴喷射靶激光等离子体光源实验[J]. *光学精密工程*, 2006, 14(6):939-943.

- NI Q L. Experimental investigation on a laser-produced plasma source with liquid aerosol spray target[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(6):939-943. (in Chinese)
- [9] 尼启良. 纳秒激光等离子体光源的光谱测量技术[J]. *光学精密工程*, 2005, 13(2):212-217.
- NI Q L. Technology for measuring spectrum from nanosecond laser plasma soft X-ray source[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005, 13(2):212-217. (in Chinese)
- [10] 尼启良, 巩岩, 陈波, 等. 激光等离子体软 X 射线源光谱强度测量方法[J]. *光谱学与光谱分析*, 2004, 24(1):1-3.
- NI Q L, GONG Y, CHEN B, *et al.*. The method to measure spectrum intensity from nanosecond laser plasma soft x-ray source[J]. *Spectroscopy and Spectrum Analysis*, 2004, 24(1):1-3. (in Chinese)
- [11] 曹继红, 尼启良, 巩岩, 等. 虚拟仪器实现极紫外波段光谱数据采集和处理[J]. *光学精密工程*, 2002, 10(6增):103-106.
- CAO J H, NI Q L, GONG Y, *et al.*. Data acquisition and processing in EUV band with Labview program[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2002, 10(6 Supp.):103-106. (in Chinese)

作者简介: 尼启良(1966—), 男, 辽宁辽阳人, 博士, 副研究员, 主要从事软 X 射线和紫外光学的研究。E-mail: niqiliang@yahoo.com

● 下期预告

光纤传感测量系统在超导转子旋转装置中的应用

胡新宁^{1,2}, 王秋良¹, 崔春艳^{1,2}, 韩立¹, 鞠昱^{2,3}, 王欣³, 谢亮³

(1. 中国科学院应用超导重点实验室, 中国科学院电工研究所, 北京 100190;

2. 中国科学院研究生院, 北京 100039; 3. 中国科学院半导体研究所, 北京 100083)

介绍了超导转子旋转驱动原理以及应用在超导转子旋转装置中的一种光纤传感测量系统。光纤传感测量系统包括微位移光纤传感器、转速光纤传感器、电机控制光纤传感器和信号读取图形, 该系统能够进行转子悬浮微位移和旋转速度的测量并提供转子旋转所需的控制信号。在 4.2 K 低温下进行了转子悬浮和旋转实验, 超导球形转子悬浮微位移测量分辨率为 10 μm , 转子转速达到了 1 365 r/min。实验结果为进一步应用光纤传感测量系统精确监控超导转子工作姿态提供了参考。