

文章编号 1004-924X(2004)06-0576-05

# 使用气体靶激光等离子体光源的软 X 射线反射率计

尼启良, 齐立红, 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:** 建立了一台使用气体靶激光等离子体光源的软 X 射线反射率计, 并给出了使用该反射率计测量软 X 射线多层膜反射率的方法。与金属靶等离子体光源相比, 由于使用了气体靶等离子体光源, 该反射率计具有低碎屑、可长期连续运行等优点。针对单色仪的二级光谱对反射率测量结果产生的影响, 提出了修正方法。并用此方法对实测的工作波长为 17.1 nm 软 X 射线多层膜的反射率曲线进行了修正。

**关键词:** 软 X 射线反射率计; 多层膜; 激光等离子体; 气体靶

**中图分类号:** O536 **文献标识码:** A

## Soft X-ray reflectometer based on laser-produced plasma source with a gas-jet target

NI Qi-liang, QI Li-hong, CHEN Bo

(State key lab of applied optics, Changchun Institute of Optics, Fine mechanics and Physics, Chinese Academy of sciences, Changchun 130033, China)

**Abstract:** A soft X-ray reflectometer using a laser produced plasma (LPP) light source with gas jet target is built, and the method to measure the reflectance of soft X-ray multilayer coatings employing the reflectometer is presented. In comparison with metal target LPP source, due to usage of gas-jet target LPP source, the reflectometer is debris-free and can continuously operate for a long time. At the same time, a new method to delete the effect of 2nd spectrum from monochromator on measurement results of soft X-ray multilayer coatings reflectance is put forward. A curve of reflectance Vs. wavelength of soft X-ray multilayer coating with center wavelength 17.1 nm is modified to utilize the method.

**Key words:** soft X-ray reflectometer; multilayer coating; laser-produced plasma; gas-jet target

### 1 引言

目前大部分软 X 射线多层膜反射镜正入射反射率的测量依靠于使用同步辐射作光源的软 X

射线反射率计<sup>[1-7]</sup>, 因为同步辐射能够产生连续的、具有很高的平均亮度的单色软 X 射线辐射。但是世界上仅有的几个使用同步辐射的软 X 射线反射率计都分布在少数几个建有同步辐射的地方, 远离软 X 射线镀膜车间或实验室, 给多层膜

反射率的测量及其结构的优化带来了不便。为了解决这一问题, 几个使用激光等离子体光源的反射率计陆续被建立起来<sup>[8-11]</sup>。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同步辐射反射率计容易得多。迄今为止, 所有的此类反射率计均使用掠入射单色仪作为分光 and 波长选择元件、以掠入射球面反射镜为聚光元件, 并使用高 Z 金属靶的激光等离子体光源。虽然这类仪器不能提供同步辐射那样的光强, 但它们对多层膜光学的发展仍然发挥着很重要的作用。鉴于高 Z 金属靶的激光等离子体光源产生大量的污染多层膜元件的碎屑, 研制了一套使用 Kr 气体靶激光等离子体光源的软 X 射线反射率计, Kr 是高 Z 元素, 在软 X 射线波段产生连续谱。这种光源具备无碎屑、低污染的优点, 而且可以连续长时间工作。

## 2 气体靶激光等离子体光源工作原理及结构

图 1 为所研制的高重复频率脉冲气体靶截面图, 其中核心部件为压电陶瓷振子。在未给压电陶瓷振子施加电场时, 该压电振子在弹簧 G 与 E

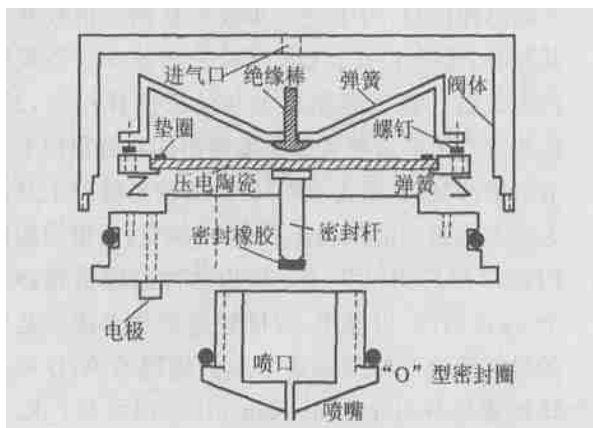


图 1 压电陶瓷喷气阀结构示意图

Fig. 1 Structural illustration of piezoelectric gas jet

的作用下处于平衡位置, 密封杆 C 通过位于其上的密封橡胶紧顶气体出口处, 此时, 阀的内部气体气压很高, 称之为背景压力。当给压电陶瓷振子加上电场之后, 压电陶瓷晶体开始振动, 并带动密封杆一起运动。当密封杆上的密封橡胶离开气体

喷嘴 L 时, 就会有气体以极快的速度从喷嘴射出。给压电陶瓷加一段时间电压之后, 退掉电压, 则压电振子在弹簧作用下又回到平衡位置, 这样就完成了一个气体脉冲的喷射过程。喷气阀的阀体采用不锈钢材料, 其所有的密封口处都用橡胶“O”圈进行密封。密封杆直接用特殊的胶粘到压电陶瓷片上, 并要保证其正好位于陶瓷片的中心处。用聚四氟乙烯导线直接焊接在陶瓷表面做为阳极, 阀体当作阴极。通过调节喷嘴部分的螺纹松紧来调节气体脉冲的上升、下降时间的快慢, 进而产生“干净”的气体脉冲。

## 3 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 2 所示, 它由气体靶激光等离子体光源、掠入射光栅单色仪、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。

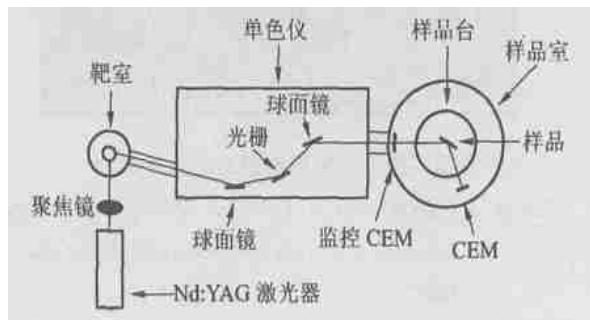


图 2 反射率计的结构简图

Fig. 2 A schematic diagram of the soft X ray reflectometer

掠入射恒偏角单色仪由前置反射镜、凹面光栅和后置反射镜组成。单色仪的入射和出射狭缝与光栅中心的夹角为  $166^\circ$ , 入缝、出缝和光栅同在半径为 1.5 m 的罗兰圆上。保持入缝、出缝不动, 通过光栅绕其中心转动可方便地进行光谱扫描。整个系统的优点是光栅的入射和出射光线有固定的方向, 因此, 输出光束的发散角不取决于波长。

所用光栅是半径为 3 m 的 Milton Ray 凹面光栅, 表面镀金反射膜, 刻划密度 600 g/mm, 刻划面积 50 mm (width)  $\times$  30 mm (length), 闪耀波长 150 nm, 闪耀角  $2.5^\circ$ , 光束入射角  $83^\circ$ , 其中入

缝和出缝距光栅中心的距离分别为 510 mm 和 254 mm。前置和后置反射镜均是半径 4 m 的凹面镜。前置反射镜将点光源产生的发散软 X 射线收集到单色仪入缝,并将输出的光束准直在水平的位置平面上,后置反射镜的作用是将出缝处的单色软 X 射线会聚到探测器上。单色仪的波长范围是 8~30 nm,在入缝和出缝宽度为 50  $\mu\text{m}$  时,波长分辨率 0.08 nm,入射到多层膜样品上的光束大小是 1 mm  $\times$  1 mm,被测多层膜样品的最大尺寸是 130 mm  $\times$  120 mm  $\times$  120 mm (长  $\times$  宽  $\times$  高),对于大样品,通过在样品上选取不同的采样点逐点地测量反射率。如果样品的尺寸较小,例如 10 mm  $\times$  10 mm  $\times$  1 mm,在不需打断真空系统的前提下,能同时测量 5~10 块这样的小样品。



图 3 测量多层膜反射率的软件界面

Fig. 3 Interface of a Labview software used to measure the reflectance of multi-layer coatings

反射率测量是由 Labview 图形语言编制的软件来完成的。待测软 X 射线多层膜样品的转动及探测器的转动、样品在样品架上的三维平动、波长的扫描等均由步进电机驱动。步进电机驱动器通过 RS232 接口由计算机控制。软件的界面如图 3。

通过扫描波长可以测量在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,入射角的范围是 6~90°。

在测量软 X 射线多层膜样品的反射率时,为了消除光源的不稳定性,将同一入射光束分为上下两部分,同时使用两个相同的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,称为监控探测器,用来测量光束下部分的强度;另一个探测器位于样品台上,用来测量同一光束上部分的强度或这上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,既二者的比值  $I_R/I_{RM}$  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。在某一波长或入射角的反射率为:

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

$$\text{或} \quad R(\theta) = \frac{I_S(\theta)/I_{SM}(\theta)}{I_R(\theta)/I_{RM}(\theta)}. \quad (2)$$

图 4 给出了探测电路的示意图。为了消除可见光的影响,在样品室的入口处放置了一片 Lux-el 公司的厚度是 150 nm 的铝滤光片。监控探测器和主探测器使用的是 5900 Magnum 型通道电子倍增器,它们均处于模拟工作状态。由它们将入射的光脉冲信号变成电脉冲信号,两个 CR-100D 电荷灵敏前置放大器被分别用于放大这两个电脉冲信号,为了进一步放大这两个信号并对其滤波,选择了一个 ORTEC 公司的 855 型非线性放大器。除了起到放大和滤波的作用外,855 还能将电荷灵敏前置放大器输出的具有很快上升沿的脉冲变缓,因为 CR-100D 的输出脉冲上升沿太陡不能被峰值探测器 PH300 接受,峰值探测器 PH300 的作用是将 855 输出脉冲的峰值保持几十  $\mu\text{s}$  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。对于某一入射波长,从单色仪出射的光束中除了这一波长的一级衍射光谱以外,还包含着高级衍射光谱<sup>[8,9]</sup>。由于使用了铝滤光片,它仅能消除 80~200 nm 的紫外光及可见光,在较短的软 X 射线波段,铝滤光片有较高的透过率,因此,探测器测量的光强度中也包含高级衍射光谱。下面将详细讨论高级衍射光谱在反射率测量中所起到的作用。

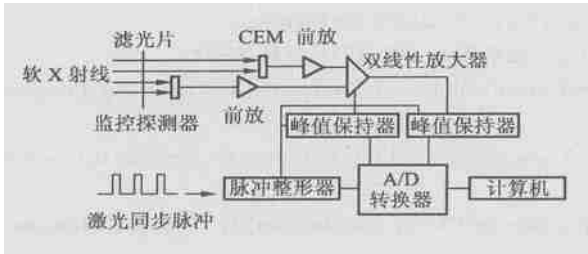


图 4 探测电路示意图

Fig. 4 Detection electronic schematic diagram

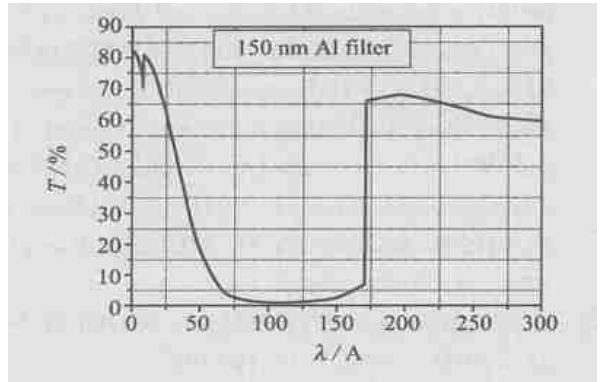


图 6 铝滤光片透过率曲线

Fig. 6 Al filter transmittance vs. wavelength h

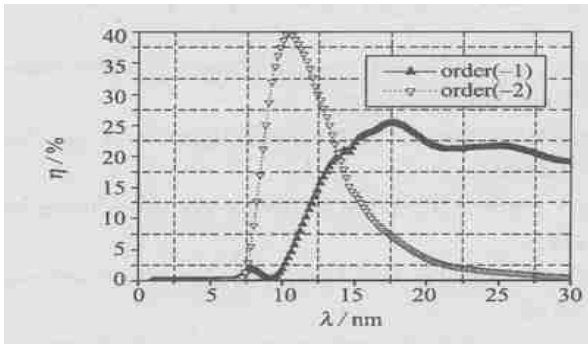


图 5 光栅效率曲线

Fig. 5 Grating efficiency vs. wavelength

图 5 给出了单色仪光栅的一级和二级衍射光在通过后置反射镜之后的效率, 在 8~ 30 nm 波段, 与一级和二级衍射光相比, 三级衍射光的效率较低, 可以忽略。如果只考虑二级衍射光的影响,  $I_S$  和  $I_R$  可以写成下面的式子:

$$I_S = I_{S_1} + I_{S_2}, \quad I_R = I_{R_1} + I_{R_2}, \quad (3)$$

测到的反射率可以写为:

$$R = \frac{(t_1 I_{S_1} + t_2 I_{S_2}) / I_{SM}}{(t_1 I_{R_1} + t_2 I_{R_2}) / I_{RM}}, \quad (4)$$

$t_1$  和  $t_2$  分别是铝滤光片对一级和二级衍射光谱的透过率。图 6 是 Luxel 公司 150 nm 厚铝滤光片在 0.1~ 30 nm 透过率曲线。由于软 X 射线多层膜的带宽很窄, 对二级衍射光的反射可以忽略, 因此,  $t_1 I_{S_1} + t_2 I_{S_2} = t_1 I_{S_1}$ 。测量到的反射率可以写成下面的表达式:

$$R = \frac{I_{S_1} / I_{SM}}{[I_{R_1} + (t_2 / t_1) I_{R_2}] / I_{RM}}, \quad (5)$$

与式(1)相比, 上面的反射率表达式(5)中, 分母多

参考文献:

[1] 薛松, 邵景鸿, 徐正良. 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 multily-

了一项  $(t_1 / t_2) I_{R_2}$ , 因此, 测量的反射率要小于多层膜的真实反射率, 必须加以纠正。图 7 给出了理论计算的、测量的及修正后的 Mo/Si 多层膜正入射反射率随波长变化曲线, 正入射角均为  $6^\circ$ 。图 7 的 Mo/Si 多层膜的工作波长是 17.1 nm, 30 层多层膜。

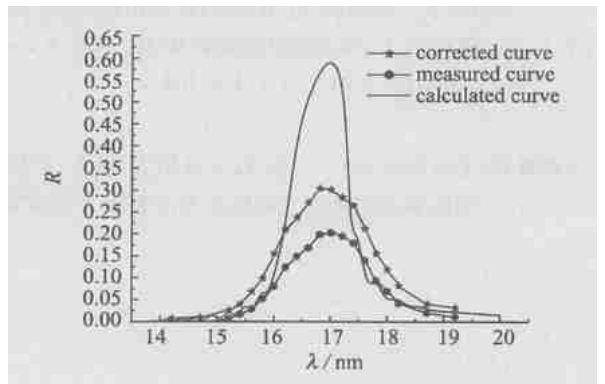


图 7 17.1nm 多层膜正入射反射率 波长曲线

Fig. 7 Normal incident reflectance vs. wavelength

4 结 论

建立了一台实验室使用的软 X 射线反射率计。该反射率计以 Kr 气体靶等离子体为光源, 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。同时探讨了二级光谱对反射率测量结果的影响, 并对实测的工作波长为 17.1 nm 多层膜的反射率进行了修正。

- er dispersing[J]. *Optics and Precision Engineering*, 1993, 1(3): 24-28. (in Chinese)
- [2] 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]. *Optics and Precision Engineering*, 1994, 2(3): 85-88. (in Chinese)
- [3] LUDWING V L, THOMAS B, HERMANN M, *et al.* A new laboratory EUV reflectometer for large optics using a laser plasma source[J]. *SPIE*, 2003, 5038: 12-21.
- [4] FUCHS D, KRUMREY M, MULLER P, *et al.* High precision soft X-ray reflectometer[J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 1995, 66(2): 2248-2250.
- [5] KRUMREY M, MULLER M P, SCHOLZE F, *et al.* Precision soft X-ray reflectometry of curved multilayer optics[J]. *SPIE*, 1991, 1547: 136-143.
- [6] TARRIO C, WATTS R N, LUCATORTO T B. Improved reflectometry facility at the national institute of standards and technology[J]. *SPIE*, 1994, 2011: 534-539.
- [7] JOHANNES TUMMLER, HEIKE BLUME, GUIDO BRANDT, *et al.* Characterization of the PTB EUV reflectometry facility for large EUVL optical components[J]. *SPIE*, 2003, 5037: 265-273.
- [8] AKIRA MIYAKE, TAKESHI MIYACHI, MITSUAKI AMEMIYA, *et al.* LPP-based reflectometer for characterization of EUV lithography systems[J]. *SPIE*, 2003, 5037: 647-655.
- [9] 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.
- [10] JOHANSSON G A, BERGLUND M. Compact soft X-ray reflectometer based on a line-emitting laser plasma source[J]. *Review of scientific instruments*, 2001, 72(1): 58-62.
- [11] WINDT D L, WASKIEWICZ W K. Soft X-ray reflectometry of multilayer coatings using a laser plasma source[J]. *SPIE*, 1991, 1547: 144-158.

作者简介: 尼启良(1966-), 男, 辽宁辽阳人, 博士, 副研究员, 现在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主要研究方向为软 X 射线和紫外光学研究工作。