

表面粗糙度对软 X 射线多层膜 光学特性的影响

易 葵 邵建达 范正修

(中国科学院上海光学精密机械研究所光学薄膜中心, 上海 201800)

摘 要 从理论和实验结果两方面探讨了基底表面和多层膜膜面的均方根粗糙度对软 X 射线多层膜的光学特性的影响。指出了分析表面粗糙度最合适的方法和对表面粗糙度的着重研究方向。

关键词 粗糙度, 软 X 射线多层膜, 反射率。

1 引 言

软 X 射线多层膜元件对表面粗糙度的要求是十分严格的, 这是由它的应用波长范围所限定的。国际上所报道使用的基底, 其表面均方根粗糙度均至少在 0.5 nm 以下, 甚至在 0.1 nm^[1] 以下。

在标定表面的粗糙度的手段中, 有直接测量和间接测量两大类方法可供研究者选择^[2]。直接测量方法包括已商品化的如 Alpha-Step、Dektak、Talystep 等型号的机械探针轮廓仪, 和如 WYKO、TOPO、Zygo Maxim 等型号光学轮廓仪。此外还包括最近才发展起来的如扫描隧道显微镜和原子力显微镜(AFM)扫描探针显微镜方法。间接测量方法是简单的散射测量方法, 如散射总积分法和角分辨散射法。

为估计基底和薄膜表面的粗糙度对多层膜的光学特性的影响, 一般采用德拜-威廉因子 η_{DW} 作为反映粗糙度影响定量因子^[3]。 η_{DW} 因子的数学表达式为:

$$\eta_{\text{DW}} = \exp[-2(2\pi\sigma \cos \alpha/\lambda)^2]$$

其中, σ 为均方根粗糙度值, α 为入射角, λ 为软 X 射线的波长。由于软 X 射线波段的特殊性, 一般情况下粗糙度相对于波长和周期厚度来说是一个很大的值, 对于粗糙度的处理与其它波段的处理是不一样的。本文将结合实际获得的对 13.1 nm 波长、45°入射设计的 Mo/Si 多层膜在激光等离子体反射率测量方法中的反射率结果为讨论对象, 利用测得的粗糙度及用不同分析方法具体分析了基底粗糙度对它的影响, 并由此确定实际分析中最合适的分析方法。

2 基底粗糙度的测量

样品基底采用经本实验室建立的水中抛光的 K₉ 玻璃基底, 利用 Zygo Maxim 3D-5700 型

光学干涉轮廓仪(其标定测量精度为 0.1 nm)对基底的表面均方根粗糙度进行了测量。测得该样品基底均方根粗糙度的多点平均值为 1.1 nm, 而且沉积了多层膜后的膜面的测量结果也表明其实际膜面的粗糙度仍稳定在这个值的附近。图 1 是利用 Zygo 测量时结果。

3 表面粗糙度的分析模型

多层膜实际所能获得的特性是与多层膜的实际的结构参数相关的。从理论上获得的预计反射率总是与实际结果有一些差别。这是由于软 X 波段材料光学常数的不完善、实验中的误差以及在实际多层膜的结构中存在着不可避免的结构缺陷造成的。通常可以归结为这些原因: 膜层厚度的随机误差、膜表面粗糙度、膜层界面的粗糙度。在缺乏实际反射率测量的情况下, 可以从诸如小角 X 射线衍射、透射电子显微镜剖面分析等方法中获得的多层膜结构参数中^[4], 拟合出多层膜可能的反射率预计值。而在具体的拟合过程中, 渗透层可以看作是光学常数从一种材料到另一种材料渐变的一个稳定的膜层。在早期的工作中, 已有报道证明不同次序沉积的界面其渗透层的厚度是不一样的; 对膜层厚度的随机监控误差, 则可以引入伪随机数进行拟合。

对膜层间界面粗糙度的考虑有二种不同的处理方法, 一种是将界面上的粗糙度同膜表面粗糙度一样用 η_{0w} 因子来处理, 另外一种是将界面上的粗糙度作为界面间的渗透来考虑(渗透层可以看作是光学常数从一种材料到另一种材料渐变的一个稳定的膜层, 在早期的工作中, 已有报道证明不同次序沉积的界面其渗透层的厚度是不一样的)。而对 η_{0w} 的处理, 也有二种方式, 一种是利用菲涅耳公式计算时将 η_{0wj} 开方后乘入第 j 个界面的反射系数中; 另一种是在利用菲涅耳公式计算时是将 η_{0wj} 直接乘入第 j 个界面的反射系数中。

4 Mo/Si 多层膜实测反射率与粗糙度的关系

利用平面磁控溅射方法, 淀积了波长 13.1 nm、入射角为 45° 的 Mo/Si 多层膜反射镜。具

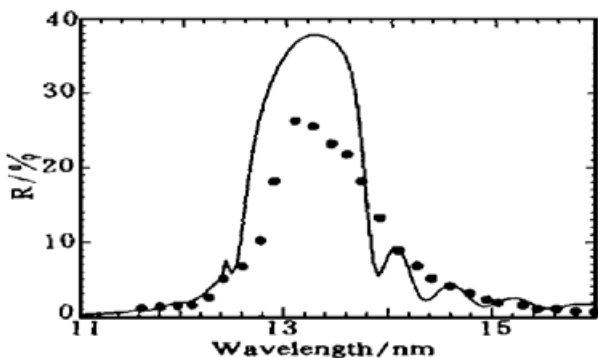


Fig. 2 Measured reflectance (dots) and calculated reflectance (line) of sample

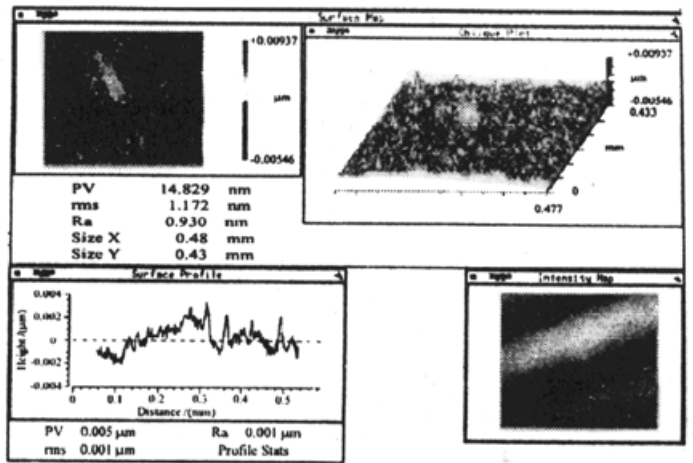


Fig. 1 Measured roughness of sample with Zygo profilometer

体的淀积和测试过程, 在早期工作中已有详细报道^[5-8]。表 1 给出了该多层膜的具体设计参数, 实际周期厚度为 9.86 nm ($d_{Mo} = 3.9$ nm, $d_{Si} = 5.96$ nm)。

图 2 给出了该多层膜在激光等离子体反射率测量中的具体反射率结果。

利用已测出的该测试样品基底的表面粗糙度值对该多层膜进行一定的拟合。

Table 1. The designed parameters and calculated reflectance of Mo/Si multilayer with 13.1 nm wavelength and 45° incidence

	wavelength	incidence angle	layers	D /nm	d_{Mo} /nm	d_{Si} /nm	R
Mo/Si	13.1 nm	45°	41	9.694	3.839	5.855	37.85%

图 3 和图 4 是将界面上的粗糙度归结到界面上的渗透层中来处理,膜表面的粗糙度用 η_{DW} 来处理,但图 3 中 η_{DW} 的处理是直接乘入表面层的反射系数中,而图 4 中 η_{DW} 的处理是开方后乘入表面层的反射系数中。在拟合计算中多层膜界面渗透层厚度取 $d = 1.1$ nm(界面层分为 20 个细层,而在每个细层中认为其光学常数为固定),膜表面粗糙度取 $\sigma = 1.1$ nm,周期厚度随机误差取 $\delta_{\text{SD}} = 0.2$ nm(平均周期厚度随机误差为 0)。

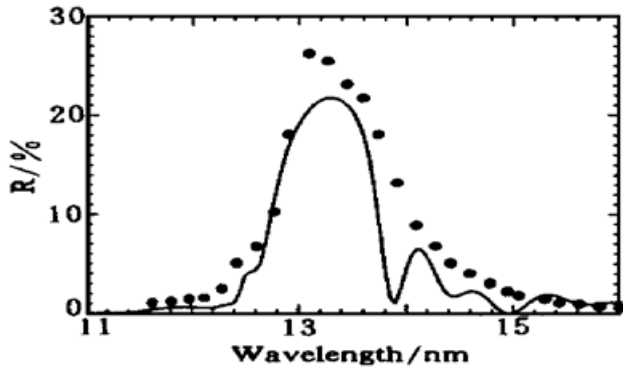


Fig. 3 Measured reflectance (dots) of sample, simulated reflectance (solid line) of sample with $\sigma = 1.1$ nm, $d = 1.1$ nm, $\delta_{\text{SD}} = 0.2$ nm and by multiplying the Fresnel coefficients with η_{DW} before using the Fresnel formulas

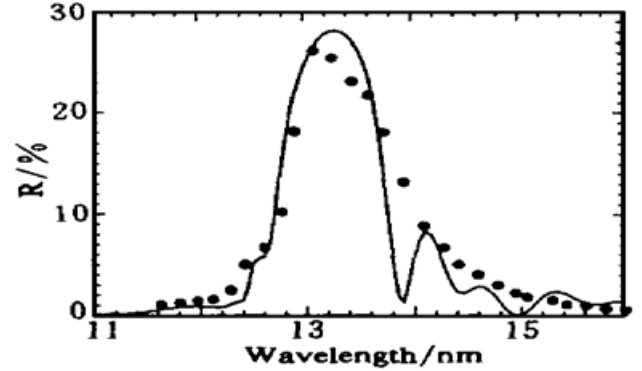


Fig. 4 Measured reflectance (dots) of sample, simulated reflectance (solid line) of sample with $\sigma = 1.1$ nm, $d = 1.1$ nm, $\delta_{\text{SD}} = 0.2$ nm and by multiplying the Fresnel coefficients with $\eta_{\text{DW}}^{\text{is}}$ before using the Fresnel formulas

图 5 和图 6 是将界面上的粗糙度跟膜表面的粗糙度一样用 η_{DW} 来处理,但图 5 中 η_{DWj} 的处理是直接乘入第 j 个界面的反射系数中,而图 6 中 η_{DWj} 的处理是开方后乘入第 j 个界面的反射系数中。在拟合计算中多层膜界面粗糙度取 $\sigma' = 1.1$ nm,膜表面粗糙度取 $\sigma = 1.1$ nm,周期厚度随机误差取 $\delta_{\text{SD}} = 0.2$ nm(平均周期厚度随机误差为 0)。

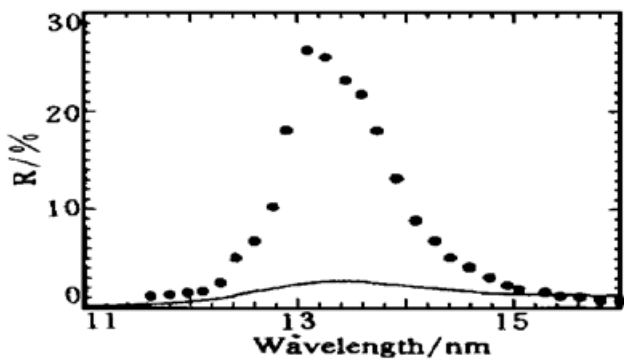


Fig. 5 Measured reflectance (dots) of sample, simulated reflectance (line) of sample with $\sigma = 1.1$ nm, $\sigma' = 1.1$ nm, $\delta_{\text{SD}} = 0.2$ nm and by multiplying the Fresnel coefficients with η_{DW} before using the Fresnel formulas

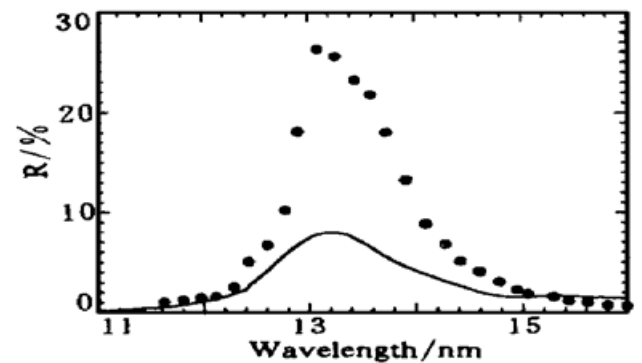


Fig. 6 Measured reflectance (dots) of sample, simulated reflectance (line) of sample with $\sigma = 1.1$ nm, $\sigma' = 1.1$ nm, $\delta_{\text{SD}} = 0.2$ nm and by multiplying the Fresnel coefficients with $\eta_{\text{DW}}^{\text{is}}$ before using the Fresnel formulas

4 分析与讨论

从图 3 至图 6 的拟合曲线可看出图 4 的拟合结果与实际测量结果符合较好, 这也就是说, 将界面上的粗糙度归结到界面上的渗透层中来处理, 膜表面的粗糙度用 η_{dw} 来处理, 而 η_{dw} 的处理是开方后乘入表面层的反射系数中, 这种拟合方法是比较符合实际的。

图 7、图 8 的拟合条件与图 4 基本一致, 不同的是图 7 拟合时周期厚度随机误差取 $\delta_{\text{SD}} = 0.7 \text{ nm}$; 图 8 拟合时表面粗糙度取 $\sigma = 1.45 \text{ nm}$, 渗透层取 $d = 1.45 \text{ nm}$ 。从图 4、图 7 和图 8 的拟合曲线可看出周期厚度随机误差对反射率的影响并不大。并且从以往膜厚的定标过程来看膜厚随机监控误差一般在 $0.1 \sim 0.2 \text{ nm}$ 左右。因此影响该样品的反射率的主要因素是基底表面粗糙度。

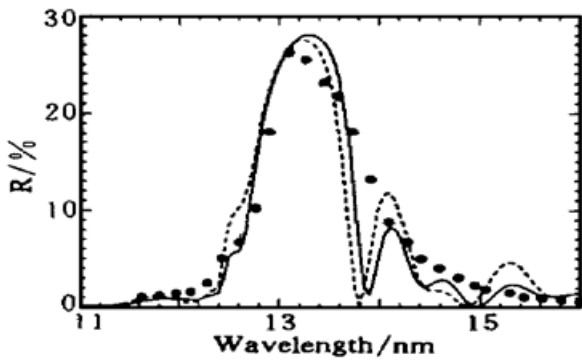


Fig. 7 Measured reflectance (dots) and simulated reflectance (dash line) of sample with $\sigma = 1.1 \text{ nm}$, $d = 1.1 \text{ nm}$, $\delta_{\text{SD}} = 0.7 \text{ nm}$ and by multiplying the Fresnel coefficients with $\eta_{\text{dw}}^{1/2}$ before using the Fresnel formulas. Simulated reflectance (solid line) of sample with $\sigma = 1.1 \text{ nm}$, $d = 1.1 \text{ nm}$, $\delta_{\text{SD}} = 0.2 \text{ nm}$ and by multiplying the Fresnel coefficients with $\eta_{\text{dw}}^{1/2}$ before using the Fresnel formulas

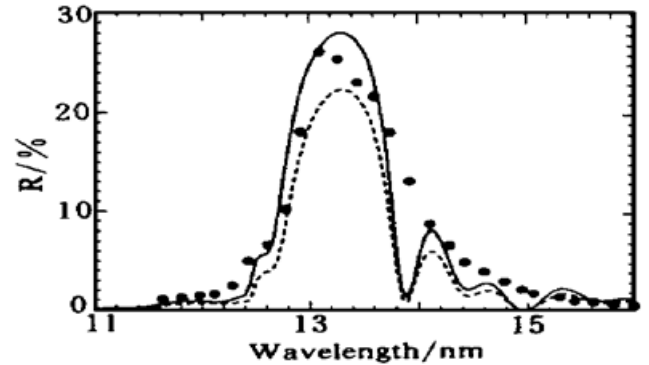


Fig. 8 Measured reflectance (dots) and simulated reflectance (dash line) of sample with $\sigma = 1.45 \text{ nm}$, $d = 1.45 \text{ nm}$, $\delta_{\text{SD}} = 0.2 \text{ nm}$ and by multiplying the Fresnel coefficients with $\eta_{\text{dw}}^{1/2}$ before using the Fresnel formulas. Simulated reflectance (solid line) of sample with $\sigma = 1.1 \text{ nm}$, $d = 1.1 \text{ nm}$, $\delta_{\text{SD}} = 0.2 \text{ nm}$ and by multiplying the Fresnel coefficients with $\eta_{\text{dw}}^{1/2}$ before using the Fresnel formulas

以上拟合是从整体反射情况来分析的, 对于具体某一点来说拟合后可能还有偏差。这主要是测量时还存在一些其它误差来源, 比如说测量时的读数误差, 测量时光斑大小对测量的影响, 测量时测量点不够密集。但这些误差的影响相对来说是小的。

结 论 从以上可知在测得基底表面粗糙度的情况下, 分析它对软 X 射线多层膜光学特性的影响的最合适的方法是将界面上的粗糙度归结到界面上的渗透层中来处理, 膜表面的粗糙度用 η_{dw} 因子来处理, 而 η_{dw} 因子的处理是开方后乘入表面层的反射系数中。并且可知基底表面粗糙度是影响多层膜反射率的主要因素。因此首要解决的问题是基底的抛光问题, 建立超精抛精工序。另外还可采用一些辅助方法, 如采用离子束刻蚀对基底进行制膜前的预抛光; 采用在制膜前先在基底上预镀一薄层低 Z 材料(如 C, Si)改善基底的粗糙度^[9], 这些方法都在一定程度上可减小基底的粗糙度。

参 考 文 献

- [1] Stearns D G, Rosen R S, Vernon S P. Multilayer mirror technology for soft X-ray projection lithography. *Appl. Opt.*, 1993, **32**(34) : 6952~ 6960
- [2] Henke B L, Lee P, Tanaka T J *et al.*. The atomic scattering factor, $f_1 + if_2$, for 94 elements and for the 100 to 2000 eV photon energy region. *AIP Conference Proceedings*, 1981, (75) : 340~ 388
- [3] Michette A G. *Optical Systems for Soft X Rays*. New York: Plenum Press, 1986.
- [4] 倪云龙, 毛楚生, 吴 江等. 平焦场光栅谱仪. *强激光与粒子束*, 1991, **3**(2) : 242~ 248
- [5] 邵建达, 范正修, 金 磊等. 制备软 X 射线多层膜的转速控厚法. *中国激光*, 1991, **18**(5) : 171~ 175
- [6] 殷功杰, 范正修, 邵建达. 小角衍射法精确测定 Mo/Si 软 X 射线多层膜的结构. *中国激光*, 1993, **A20**(12) : 900~ 905
- [7] 邵建达, 范正修, 王桂英等. 多层膜结构和界面分析应用中的高分辨率透射电镜剖面分析. *中国激光*, 1994, **A21**(6) : 457~ 462
- [8] 熊岳南, 倪元龙, 吴 江等. X 光多层膜反射镜反射特性实验研究. *光学学报*, 1997, **17**(2) : 243~ 248
- [9] 邵建达, 范正修, 易 葵等. 薄硅膜对基底表面粗糙度的影响. *中国激光*, 1996, **23**(9) : 801~ 805

Effects of Roughness on Characterization of Soft X-Ray Multilayer Coating

Yi Kui Shao Jianda Fan Zhengxiu

(*Optical Coating Center, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics,
The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800*)

(Received 31 March 1998; revised 18 May 1998)

Abstract The effects of roughness on the reflectance of soft X-ray multilayer coating are discussed experimentally and theoretically. The suitable method for analyzing the effects of roughness, and the direction of studying the roughness are presented.

Key words roughness, soft X-ray multilayer coating, reflectance.