

文章编号: 0258-702X(2002)03-0236-03

软 X 射线多层膜反射镜界面粗糙度的一种估算方法

宋利民, 胡家升

(大连理工大学电子与信息工程学院, 辽宁大连 116024)

提要 介绍了描述单个非理想粗糙界面散射的 D. G. Stearns 法, 它适用于软 X 射线短波段区域。将这种方法应用到多层膜结构, 并采用它的数学模型来描述软 X 射线短波段区域(1 ~ 10 nm)多层膜界面粗糙度。在此理论下, 对波长为 4.77 nm 的 Co/C 多层膜反射镜界面粗糙度进行了分析, 估算出该多层镜界面间均方根粗糙度为 0.7 nm。

关键词 多层镜, 界面粗糙度, 反射率

中图分类号 O 484.5 文献标识码 A

A Method of Evaluating the Roughness of a Co/C Multi-layer Film

SONG Li-min, HU Jia-sheng

(School of Electronic and Information Engineering, Dalian Univ. of Tech., Dalian 116024)

Abstract Stearns' scattering method is introduced in this paper, which describes the scattering of a single non-ideal interface and is applicable for soft X-ray short wavelength region. It is then extended to multi-layer structure and uses a mathematical modal from Stearns' method to describing the multi-layer interface roughness at soft X-ray short wavelength region (1 ~ 10nm). Under the framework of this theory, the interface roughness of a Co/C multi-layer mirror with the wavelength of 4.77 nm is analyzed. The root-mean-square roughness of the multi-layer interface of the mirror is 0.7 nm.

Key words multi-layer mirror, interface roughness, reflectance

1 引 言

多层膜反射镜已成功地应用于惯性约束聚变(ICF) X 射线光刻、天文学、生物显微术等许多领域^[1~4]。设计多层镜的一般方法是假设多层膜界面为理想界面, 利用迭代法或矩阵法^[5]加以计算, 得出最佳的周期厚度、两种材料最佳厚度配比及最佳周期数。然而, 镀膜后实际测量的反射率比这种理论计算的反射率有较大的下降。究其原因, 第一是由于基底粗糙度在界面被复制以及界面材料间的扩散使得界面变为非理想界面, 即界面粗糙度导致了非镜面散射的增加; 第二, 镀膜过程中产生的膜厚误差也会导致反射率的降低。我们研制了一块波长 4.77 nm, 周期 30 层的 Co/C 软 X 射线多层膜反射镜, 其理想反射率峰值为 50%, 而实测反射率峰值为 19%。小角 X 射线衍射结果显示该多层膜的实

际周期厚度与设计周期误差只有 ± 0.05 nm, 所以反射率下降的主要原因是界面粗糙度。镀膜工艺的参数对多层膜界面粗糙度的大小有较大的影响, 反过来一块多层膜反射镜界面粗糙度的确定对镀膜工艺参数的定标也有实际的意义。因此, 对该多层膜反射镜界面粗糙度进行研究并进行估算是非常必要的。

目前对界面粗糙度的估算方法主要采用德-拜因子(D-W 因子), 这种方法的理论基础是标量散射理论。从标量散射理论的角度来看, 其描述粗糙界面的近似条件之一^[6,7]就是入射光的波长要远大于界面的粗糙度; 所以在软 X 射线短波段区域, 这个条件已经不能完全成立。所以需要寻求一种新的散射思想来描述软 X 射线短波段区域, 本文利用 D. G. Stearns 的关于单个粗糙界面的散射理论^[8]来描述多层膜界面间的粗糙度, 并应用它估算波长为 4.77

nm 的 Co/C 多层膜的粗糙度。

2 D. G. Sterns 关于单个非理想界面的研究

X 射线入射到非理想界面的示意图如图 1 所示。其中 ϵ_0 为上层材料的介电常数, ϵ' 为界面下层材料的介电常数。

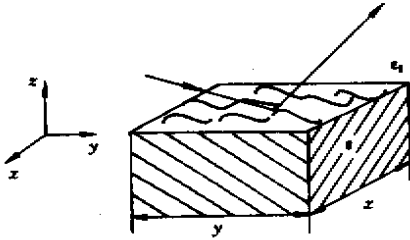


图 1 X 光入射粗糙界面

Fig.1 Incidence of X-ray to an interface of roughness

设入射 X 射线电场

$$E^0(x) = e^0 \exp(ikn^0 \cdot x) \quad (1)$$

则 E^0 满足方程

$$(\nabla^2 + k^2)E^0 = 0 \quad (2)$$

公式(1)中 n^0 为入射波的传播方向, e^0 为极化方向。

非理想界面散射光中,镜面散射分量只对介质函数沿界面的平均变化敏感,因此引入如下的界面函数描述 $\rho(z)$, 定义 $\rho(z)$ 为沿 z 方向的介质函数的平均值

$$\rho(z) = \frac{1}{\epsilon - \epsilon_0} \frac{\iint [\epsilon(x) - \epsilon_0] dx dy}{\iint dx dy} \quad (3)$$

式中 $\epsilon(x)$ 为界面的电介质函数,关于它的描述详见参考文献[8]。定义 $u(z)$ 为界面函数的偏移,即

$$u(z) = \frac{d\rho(z)}{dz}, u(z) \text{ 的傅里叶变换用 } \bar{w}(s) \text{ 表示。}$$

根据波恩理论[5],计算反射场分量由下式表示

$$E^r(x) = \frac{-i\Delta}{(2\pi)^3 \epsilon_0} \left[(n \times e^0) \times n \right] \times \bar{g}(s - kn^0) \frac{s^2 e^{is \cdot x} ds}{(s_z - kn_z^0) (s^2 - k^2)} \quad (4)$$

式中 $\bar{g}(s)$ 为 $g(x)$ 的傅里叶变换, $g(x) = \frac{1}{\Delta} \frac{\partial \epsilon(x)}{\partial z}$ 为电介质函数 $\epsilon(x)$ 沿 z 方向的变化函数。D. G. Sterns 对(4)式进行积分,推导出单个非理想界面的 Fresnel 反射系数与界面函数的关系为

$$r(\hat{n}^r, \hat{e}^r, \hat{n}^0, \hat{e}^0) = r^0 \bar{w}(s) \quad (5)$$

式中 r^0 为理想界面的 Fresnel 反射系数,实际反射系数 r 为 E^r 与 E^0 的比值。 $\bar{w}(s)$ 为 $u(z)$ 的傅里叶变换,在这里 s 为 $\text{Re}(-2kn^0z)$, 该公式就是考虑了界面粗糙度后,对 Fresnel 公式修改的结果。

3 Co/C 多层膜界面数学模型的建立与粗糙度的估算

3.1 Co/C 多层膜界面数学模型的建立

利用公式(5)估算粗糙界面的反射率,需采用合适的界面函数模型,我们选用指数函数模型。原因如下。第一,Sterns 给出了四种实用的界面函数,包括:指数函数、误差函数、线性函数和正弦函数。我们分别选择这四种函数作为界面函数模型,进行了计算,结果显示指数模型的结果是四种函数结果的平均值。第二,基于 Co/C 多层膜的定标参数及 Co/C 多层膜的镀膜经验,该片多层膜界面粗糙主要是由界面本身的粗糙度引起的,根据参考文献[9],这时建议采用指数模型函数作为界面函数模型。设界面的平均表面 $z_0 = 0$, 界面的粗糙度为 σ 。

当 $z \leq 0$ 时,设界面函数

$$\rho(z) = \frac{1}{2} e^{2z/\sigma} \quad (6)$$

当 $z > 0$ 时,设

$$\rho(z) = 1 - \frac{1}{2} e^{-2z/\sigma} \quad (7)$$

对公式(6)(7)求导得

$$u(z) = \frac{1}{\sqrt{2}\sigma^2} e^{-\frac{\sqrt{2}|z|}{\sigma}} \quad (8)$$

对(8)式进行傅里叶变换

$$\bar{w}(s) = \frac{1}{(1 + s^2\sigma^2/2)} \quad (9)$$

将(9)式代入公式(5),有

$$r(\hat{n}^r, \hat{e}^r, \hat{n}^0, \hat{e}^0) = \frac{r^0}{1 + 8\pi^2 \sin^2(\alpha) \sigma^2 / \lambda^2} \quad (10)$$

这里 α 为入射角,公式(10)用于估算 Co/C 多层膜的粗糙度。

3.2 Co/C 多层膜粗糙度的估算

该多层膜反射镜设计制作完成后,在北京高能所同步辐射实验室利用同步辐射光源进行了实际反射率的测量,其测量结果如图 2 所示。

由图 2 可见,该反射镜的峰值反射率为 19%, 发生在 260 eV(4.77 nm)。

对该多层镜粗糙度的估算采用如下方法:首先设定界面粗糙度的初始值,对多层膜每一层界面的

Fresnel 公式利用公式(10)进行修正,这样就可以计算出考虑了界面粗糙度的多层膜反射率值,然后按照计算值画出拟合曲线。将拟合曲线图与图2的反射率实测结果进行对比,如果二者能较好地吻合,则认为所设定的粗糙度为估算的粗糙度结果。

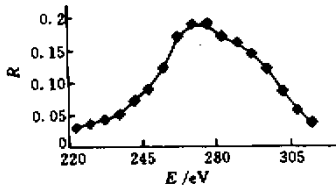


图2 反射率实测曲线

Fig.2 Measured curve of reflectance

基于上述思想编制了程序,计算不同的粗糙度

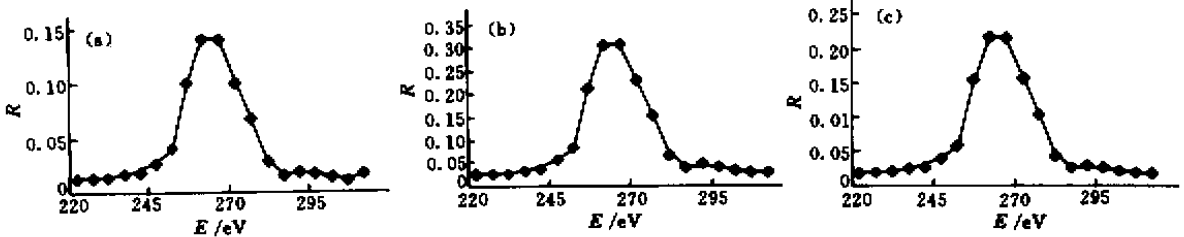


图3 粗糙度为 1 nm(a)、0.5 nm(b)和 0.7 nm(c)的拟合曲线

Fig.3 Simulative curve when roughness is 1 nm(a), 0.5 nm(b) and 0.7 nm(c)

4 结 论

综上所述,对软 X 射线短波段的多层膜粗糙度的研究不应局限于 D-W 因子,应用 D. G. Sterns 的散射理论及界面函数估算界面粗糙度是一种可行的方法。

致谢 多层膜的制作主要在中国科学院上海光机所由冯仕猛博士和祝国龙硕士完成,范正修、邵建达研究员给予了热情指导;多层膜反射率的测试是由北京高能所崔明启、朱佩平研究员和黎刚、赵屹东博士完成的,作者在此一并表示衷心感谢。

参 考 文 献

- 1 C. A. Back, R. L. Kauffman, P. M. Bell *et al.*. Characterization of Nova plasmas using an x-ray spectrometer with temporal and spatial resolution [J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 1995, **66**(1):764 ~ 766

所对应的反射率拟合曲线。在计算中取粗糙度的变化范围从 0.3 ~ 1.5 nm,步长为 0.05 nm,于是得到了 25 个反射率的拟合曲线。将这些曲线分别与反射率实测曲线图 2 进行对比,找到与图 2 吻合最好的曲线,则该曲线所对应的粗糙度即为粗糙度的估算结果。为了便于对比,给出了假设多层膜界面粗糙度分别为 1 nm、0.5 nm 和 0.7 nm 时,计算后的拟合曲线为图 3,可以看出图 3(c)明显优于其他拟合图,是与图 2 最吻合的拟合曲线。实际上,实测曲线的带宽较拟合曲线的带宽要大,其原因是由于实测的 X 光的单色性较差和同步辐射束线在 260 eV 附近高次谐波的存在,如果能去掉这两个因素的影响,则实测曲线的带宽将接近拟合曲线。所以我们认为该多层膜反射镜粗糙度的估算结果约为 0.7 nm。

- 2 D. L. Shealy, R. B. Hoover, T. W. Barbee, Jr. *et al.*. Design and analysis of a Schwarzschild imaging multilayer x-ray microscope [J]. *Opt. Eng.*, 1990, **29**(7):721 ~ 727
- 3 D. Sayre. Potential operating region for ultrasoft x-ray microscopy of biological materials [J]. *Science*, 1977, **196**(4296):1339 ~ 1340
- 4 A. B. C. Walker, Jr., J. F. Lindblom, J. G. Timothy *et al.*. The ultra high resolution XUV spectroheliograph [J]. *Opt. Eng.*, 1990, **29**(7):698 ~ 710
- 5 M. Born. Principles of Optics [M]. New York: Pergamon, 3rd, 1965
- 6 B. Vidal, P. Vincent. Metallic multilayers for x-ray using classical thin-film theory [J]. *Appl. Opt.*, 1984, **23**(11):1794 ~ 1801
- 7 J. M. Eastman. In Physics of Thin Films, Advances in Research and Development [M]. Edited by F. Hass, M. H. Francombe. New York: Academic Press, Vol.10, 1978
- 8 D. G. Sterns. The scattering of x rays from nonideal multilayer structures [J]. *J. Appl. Phys.*, 1989, **65**(2):491 ~ 506
- 9 J. M. Eastman, P. Baumeister. The microstructure of polished optical surfaces [J]. *Opt. Comm.*, 1974, **12**(4):418 ~ 420