

不连续金属薄膜对短波长软 X 射线 多层膜反射特性的影响*

邵建达 易 葵 范正修 王润文 袁利祥

(中国科学院上海光机所 上海 201800)

提要 讨论了不连续金属薄膜对软 X 射线多层膜反射特性的影响。给出了理论模型,具体计算了在短波段的软 X 射线多层膜反射率与不连续金属岛状膜在基底表面覆盖率之间的关系,修正了文献中的评估方法,并建立了新的定性评估包含不连续金属膜层的软 X 射线多层膜光学特性分析模型。

关键词 软 X 射线多层膜,不连续金属薄膜,反射率

1 引 言

在沉积短波长区的软 X 射线多层反射膜时,由于每层膜的厚度仅在 1 nm 左右甚至更小,在这样的厚度下,薄膜尤其是金属薄膜基本上还处于岛状生长阶段,薄膜的最后形态是不连续的。不连续金属薄膜必将导致薄膜表面质量的下降,如粗糙度的增加、界面结构的破坏,从而对多层膜的光学特性产生破坏性的影响。

在短波段软 X 射线多层膜的研究中,这是一个不可避免的问题。本文将文献[1]采用的评估反射率的方法称之为有效反射面积法。其思路是将按照不连续金属膜层在基底上的覆盖率设为 f , 等同于有效的反射面积,由此来估算反射率的方法。如果假设 r 为一个连续薄膜界面的菲涅耳反射系数,那么一个不连续金属岛状膜界面所给出的反射率 r' 应是 r 与 f 的乘积。如假设 f 为 0.9, $N = 50$, 那么,文献[1]中给出的反射率是理想的 0.03 倍。在这样的预示下,有一定反射特性的短波段软 X 射线多层膜的淀积变得不可能实现。

本文提出了一个新的模型,计算了在短波段的软 X 射线多层膜反射率与不连续金属岛状膜在基底表面覆盖率之间的关系,修正了文献[1]的评估方法。并建立了新的定性评估包含不连续金属膜层的软 X 射线多层膜光学特性分析模型。

2 软 X 射线多层膜结构及不连续金属岛状膜问题的提出

对一个正入射情况下使用的软 X 射线多层膜,在利用布喇格第一级衍射峰设计时,其每个周期的厚度近似地有如下形式: $P = d_1 + d_2 = \lambda/2$, 这里 P 即为周期厚度, d_1 为金属层的厚

* 国家自然科学基金资助项目。

度, d_2 为另一种材料的厚度, λ 为入射波长。一般 d_1 小于 $\lambda/4$, 在比较典型的材料组合中, 其最优化厚度在 $P/3$ 即 $\lambda/6$ 左右, 具体值则根据在设计波长处材料的光学常数而定。对在水窗波长 (4 nm 左右) 的软 X 射线来说, 金属层的厚度一般只在 0.8 nm 左右。

已有实验结果表明^[2], Pt 与 Ni 膜在岛状生长过程中是呈二维形态生长的, 而 Au 与 Cu 膜是呈三维生长的。表 1 是利用离子束溅射方法淀积的 Pt 膜在不同温度下的最小连续膜厚。虽然在最小连续膜厚的研究中, 可资借鉴的文献材料并不多, 但根据典型的呈二维生长形态的 Pt 膜的实验结论来看, 在短波段软 X 射线多层膜所要求的最优化设计金属层薄膜厚度范围内, 至今尚未能发现有沉积方法使某种材料呈现良好的连续薄膜特性。在利用分子束外延的方法时, 由于软 X 射线薄膜所用的材料的高熔点, 使得在这个领域未能得到实际的应用。

表 1 Pt 膜在不同沉积速率和基底温度下, 利用离子束溅射获得的最小连续膜厚。

Pt 膜沉积在 K9 玻璃上, 最小连续膜厚利用电阻率测量方法确定

Table 1 The minimal continuous thickness of the Pt films deposited on the corning glass using ion-beam sputtering at different substrate temperatures and deposition rates. The minimal continuous thickness determined by the conduction resistance measurements

| $T_s / ^\circ\text{C}$ | I_g / mA | V_g / kV | t_{\min} / nm |
|------------------------|-------------------|-------------------|------------------------|
| 100 | 200 | 2 | 2.2 |
| | | | 1.679 |
| | 100 | 1 | 1.623 |
| | | | 1.651 |
| 200 | 200 | 2 | 2.3 |
| | | | 3.534 |
| | 100 | 1 | 4.304 |
| | | | 3.429 |

上述讨论提出了一个有待解决的问题, 即是否如文献[1]给出的评估反射率公式那样, 在短波段不可能在存在不连续金属薄膜的情况下获得有一定反射率的多层膜结构? 不连续金属膜的存在对软 X 射线多层膜的反射特性的影响到底有多大?

3 不连续金属薄膜对软 X 射线多层膜反射特性的影响

为了评估软 X 射线多层膜在存在不连续金属薄膜的情况下的光学特性, 我们已在引言中介绍了利用不连续金属薄膜在基底上的覆盖率来认定有效反射面积计算多层膜反射特性的方法。

本文则提出一个新的、按照不连续金属薄膜的基底覆盖率来计算混合了间隔层材料后作为一个有平均光学常数来看待的膜层, 然后计算其光学特性的平均光学常数法。也就是说, 在不连续金属膜与其它间隔层材料一起被沉积为多层膜后, 平均光学常数法则是认为它是混合了两种不同材料后, 具有新的光学常数的连续、均匀的一层薄膜。而金属岛状膜所占的覆盖率 f 作为估计该连续、均匀金属与间隔层材料混合层膜光学常数的一个因子。而该层的光学常数直观地表示为两者的算术平均值, 即 $\bar{n}_{me} = f n_{me} + (1 - f) n_l$, 这里 me 代表金属层材料, l 代表间隔层材料。这样的处理方法、思路与上述的有效面积法是完全两样的, 而且其结果也将相去甚远。

为了对这种估计方法有一个直观的定量认识, 我们计算了 Co/C 多层膜在 4.4765 nm 波长处的反射率随 Co 膜层覆盖率的反射率结果, 如图 1 所示。计算中膜层数采用了 201 层, 入射角为零度。周期中 Co 膜的厚度所占周期中的比率是 0.36。对具体的覆盖率为 0.9 来说, 其反射率仅仅下降到 33.66%, 与金属膜为连续时的 36.67% 相比, 两者相差并不太远。

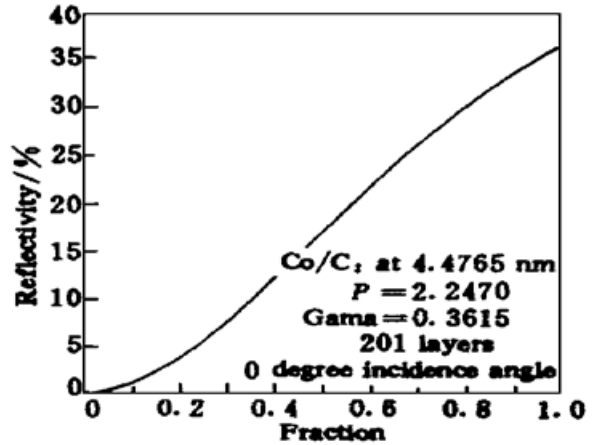


图 1 对 4.4765 nm 波长设计的 Co/C 多层膜反射率随金属层覆盖率的变化情况。多层膜的结构参数在图中已注明

Fig. 1 Reflectivity of the Co/C multilayer changes versus the cover fraction of the metal layer on the substrate. The structure parameters of the multilayer in the calculation are labeled

4 讨 论

文献中已有大量实际测得短波段软 X 射线反射率的结果报道^[2-4]; 另外, 在我们的早期工作中, 也曾经利用小角 X 射线衍射方法来确定金属薄膜的最小连续膜厚, 在很小的周期厚度下多层膜也给出了良好的衍射谱图^[5]。再从另外一个方面来考虑, 虽然在可见光范围的光学薄膜的每层膜厚是在一般认为的连续膜厚的范围内, 但在实际上, 由于薄膜的生长过程是一个柱状生长过程, 薄膜的覆盖率往往仍有可能仅在 0.9 甚至以下^[7], 那么按照有效反射面积法的认定, 反射率将很低, 但实际情况并非如此。这些都比较有力地说明有效反射面积法的预测是不符合实际情况的, 即有效反射界面不能直接用金属岛状膜的覆盖率来替代。

实际沉积的多层膜的界面上, 两种材料或多(如 Mo 与 Si) 或少(如 W 与 C) 存在互扩散和一定的化合作用, 实验证据在很多文献中已经给出^[6]。这就说明在不连续的金属膜层中, 必将由于后面间隔层膜的沉积, 实际处于一种近似为混合层的结构。而且从薄膜岛状的纳米量级的尺度上来看, 虽然在其相互之间的作用有其复杂性, 但很大的可能是处于不稳定状态的岛状金属小颗粒将很快地与后续沉积的材料之间起化合反应, 而使不连续的金属膜层逐渐地变成两种材料的化合结构。

这样在我们提出的平均光学常数法的背后, 也忽略了化合或混合不均匀带来的影响, 如图 2 所示的模型应该说更接近于实际情况。

按照图 2 模型, 将不得不考虑更为复杂的膜系结构。具体的理论计算必须首先获得金属岛状结构中的线度尺寸、混合或化合层的厚度等参数。这在实际工作中有一定的难度。但是定性地考虑, 其反射率将介于有效反射面积法与平均光学常数法所预测的两个反射率之间。金属岛状覆盖率越小, 有效反射面积法所预测的将越接近实际情况, 而随着金属岛状覆盖率的上升, 平均光学常数法所预测的结果则越有效。这样的预测, 可从



图 2 存在岛状不连续金属层的膜层结构示意图。图中随颜色深浅分别表示了金属岛状颗粒、混合或化合层及间隔层材料

Fig. 2 Schematic representation of a bi-layer structure with metal islands layer. Different gray scales represent metal, mixed and spacer materials

两方面考虑: 首先是因为岛状之间混合层的增加, 有利于增加有效的反射面积, 但同时残留的非混

合的金属岛之间的间隔层材料仍起不到反射界面的作用。其次由于混合层的光学常数不可能以相同的化学计量比存在,其光学常数必定存在一个梯度。

对 Pt/C 膜系,对 4.4765 nm 波长设计时,Pt 层的膜厚仅为 0.65 nm,岛状覆盖率 f 将很低,从上述分析中可知,这时的反射率将急剧下降,甚至如有效面积法所预测的那样,完全失去反射特性。由此可见,金属膜层的不连续问题必将是淀积短波段软 X 射线多层膜反射镜的一个十分关键的问题。

当然,不连续金属薄膜在反射率中要起作用,一定只是镜向的反射作用,但也可能由于有一定取向的金属岛状颗粒的存在而造成一种三维衍射光栅的效应。这方面的讨论已偏离本文的讨论范围,是本文后续工作的一个内容。

5 结 论

薄膜的岛状生长特性将对短波段软 X 射线多层膜的反射特性有十分明显的影响。要定量地说明影响的程度,简单的有效反射面积法与平均光学常数法存在着明显的缺陷。比较严格地处理这个问题将有待于新模型的出现,定性地说,根据本文建立的平均光学常数模型,包含不连续金属膜层的多层膜的实际反射率,将介于上述两个模型所预测的结果之间。随金属岛状层的覆盖率的变化,两个不同的模型将起不同程度的作用。

参 考 文 献

- 1 Shi Xu, B. L. Evans. Normal incidence multilayer mirrors for the wavelength range 2.3 to 4.46 nm. *J. Mod. Optics*, 1991, **38**(8) : 1631~ 1654
- 2 C. Montcalm, P. A. Kearney, J. M. Slaughter *et al.*. Survey of Ti-, B-, and Y-based soft X-ray-extreme ultraviolet multilayer mirrors for the 2- to 12-nm wavelength region. *Appl. Opt.*, 1996, **35**(25) : 5134~ 5147
- 3 A. D. Akhsakhalyan, N. N. Kolachevsky, M. M. Mitropolsky *et al.*. Fabrication and investigation of imaging normal-incidence multilayer mirrors with a narrow-band reflection in the range $\lambda \approx 4.5$ nm. *Physica Scripta.*, 1993, **48**(5) : 516~ 520
- 4 I. V. Kozhevnikov, A. I. Fedorenko, V. V. Kondratenko *et al.*. Synthesis and measurement of normal incidence x-ray multilayer mirrors optimized for a photon energy of 390 eV. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A*, 1994, **345** : 594~ 603
- 5 Shao Jianda, Fan Zhengxiu, Yi Kui *et al.*. Fabrication and thickness measurement of the thin films deposited by planar magnetron sputtering. *Chinese Journal of Lasers*, 1994, **B3** : 69~ 75
- 6 D. G. Stearns, M. B. Stearns, Y. Cheng *et al.*. Thermally induced structural modification of Mo-Si multilayers. *J. Appl. Phys.*, 1990, **67**(5) : 2415~ 2427

The Reflection Performances of Soft X-ray Multilayers for the Shorter Wavelengths with Discontinuous Metal Layers

Shao Jianda Yi Kui Fan Zhengxiu Wang Runwen Yuan Lixiang
(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800)

Abstract This paper discuss the reflection performances of soft X-ray multilayers for the shorter wavelengths with discontinuous metal layers. The theoretical models give out the relationships between the reflectivity and the fractional coverage of a discontinuous metal layer over the substrate. The results show that a model presented previously should be revised and a new analysis model is established.

Key words soft X-ray multilayer, discontinuous metal layer, reflectivity