

文章编号 1004-924X(2003)02-0136-03

膜厚控制误差对软 X 射线多层膜性能影响的分析

王 占 山

(同济大学 精密光学工程技术研究所 物理系, 上海 200092)

摘要: 针对影响多层膜性能的关键因素——膜厚控制误差进行了全面的分析计算, 指出影响多层膜性能的主要误差是仪器本身的系统偏差, 它使多层膜的峰值反射波长偏离设计值, 使得制作出的多层膜无法满足要求; 镀膜过程中的随机误差使多层膜的反射率降低, 但不影响多层膜峰值反射率波长的位置, 因此, 在制作多层膜过程中, 不但要严格控制在镀膜时的系统误差, 而且要控制随机误差。

关键词: 软 X 射线; 多层膜; 膜厚控制误差; 反射率

中图分类号: TB43 **文献标识码:** A

Effect of film thickness errors on performance of soft X-ray multilayer

WANG Zhan-shan

(Department of Physics, Institute of Precision Optical Engineering, Shanghai 200092, China)

Abstract: The effect of film thickness control errors on the performance of soft X-ray multilayer is discussed in detail. The results show that the primary error is a systemic error of the instrument itself which causes the peak of reflectivity change and the secondary error is a stochastic error which control decreases the magnitude of reflectivity.

Key words: soft X-ray; multilayer; film thickness errors; reflectivity

1 引 言

随着软 X 射线光学的发展, 多层膜反射镜显得特别重要。在过去的 30 年内, 多层膜技术的进步使其应用逐步扩大。膜厚为 2~50 nm 的多层膜可大幅度增加 0.1~30 nm 波段的反射率。多层膜是软 X 射线显微术^[1]、软 X 射线投影光刻^[2-3]的关键元件, 另外在软 X 射线激光^[4]、高温等离子体诊断^[5]、同步辐射^[6]等方面都有着广泛的应用。我国开展软 X 射线多层膜研究至今已有二十多年的历史。有关软 X 射线多层膜设计和性能模拟计算已有研究^[7], 但有关膜厚控制误差对软 X 射线多层膜性能影响的分析还有不完善的地方, 这对指导多层膜制备, 提高多层膜的性能有一定的影响。

首先将膜厚控制误差分为随机误差和系统误

差, 然后根据它们各自的特点进行分析和计算, 指出它们对多层膜性能影响的程度, 讨论了在制备多层膜时需要特别注意的问题。

2 膜厚控制误差对多层膜性能影响的分析与计算

多层膜性能模拟计算, 一般都是先在理想情况下, 即膜厚控制误差 $d = 0$, 界面不扩散且表面粗糙度 $\sigma = 0$ 时完成的。而在实际多层膜制备的过程中, 膜厚控制误差和表面粗糙度均不为 0。在模拟表面粗糙度时有许多模型。最主要的是采用 Debye-Waller 因子^[8], 它可足够精确地表示实际情况。但在膜厚控制误差的分析中, 虽然都说要考虑随机膜厚控制, 但在实际计算时没有真正将随机膜厚控制误差包括在内。只计算了系统误差造成的膜厚与理论设计值偏离。

收稿日期: 2003-01-11; 修订日期: 2003-02-21.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 60178021); 上海市科技发展基金项目 (No. 022261049)

2.1 膜厚随机控制误差对多层膜性能影响

考虑周期数 40、中心反射波长 $\lambda = 16.5 \text{ nm}$ 的正入射周期膜系,在 12.4~20.7 nm 波长来讨论膜厚随机控制误差对这个膜系的影响。

以周期膜为起点,假定膜厚根据下式变化

$$d_k^{\text{ran}} = d_k(1 + \Theta R_k), \quad (1)$$

式中的 R_k 是区间 $[-1, 1]$ 的均匀分布随机数; Θ 是随机因子,它表征膜厚随机控制误差的大小。取 500 个各含有 40 个随机数的随机序列,加入式 (1),使多层膜每个层对都随机变化,再根据多层膜的迭带公式求出多层膜反射率随波长的变化,最后将每个膜厚随机控制误差决定的反射率平均,得到在此膜厚随机控制误差下多层膜性能平均变化。不同的 Θ 将有不同的结果。这种方法能够很好的模拟随机膜厚控制误差对多层膜性能的影响。图 1 是模拟结果。

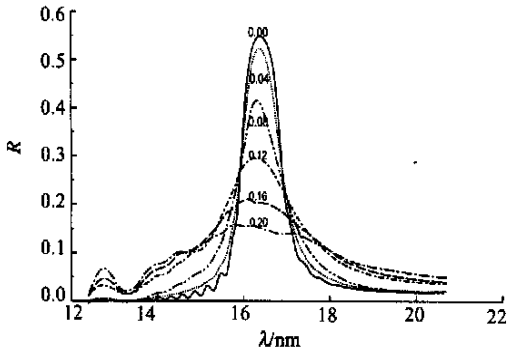


图 1 膜厚随机控制误差对多层膜反射率的影响
Fig.1 Influence of random of thickness error on reflectivity

图中的各曲线分别是 $\Theta = 0.04, 0.08, 0.12, 0.16$ 和 0.20 时的模拟结果。由图可看出,随机因子越大,反射率峰值下降越快,且在短波段形成明显的次峰。因此随着膜厚随机控制误差的增大 (Θ 增大),多层膜的反射率降低愈严重。而且波长越短,减低越快。

再来看看膜厚随机控制误差对积分反射率的影响。采取以上方法以 $\Theta = 0.04$ 为例,图 2 给出了 500 个随机序列中反射率具有最大积分值时的 $R \sim \lambda$ 关系曲线。图 3 给出了 500 个随机序列中反射率具有最小积分值时的 $R \sim \lambda$ 关系曲线。膜厚

随机控制误差对积分反射率的影响比对单个波长反射率的影响小得多。很明显膜厚控制误差越大, $R \sim \lambda$ 曲线变形越严重。

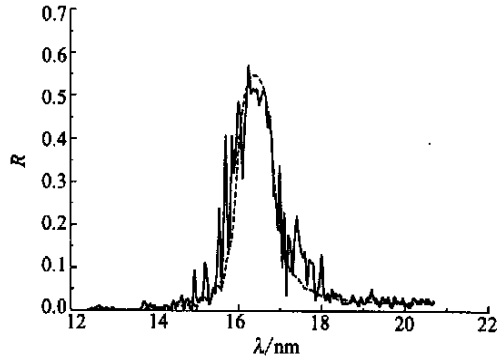


图 2 最大积分反射率膜系的 $R \sim \lambda$ 曲线
Fig.2 Curve of R versus λ of multiplayer with maximum integrated reflectivity

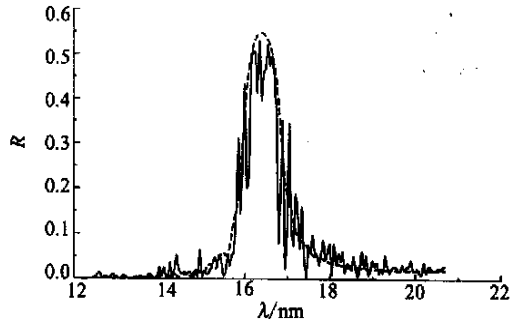


图 3 最小积分反射率膜系的 $R \sim \lambda$ 曲线
Fig.3 Curve of R versus λ of multiplayer with minimum reflectivity

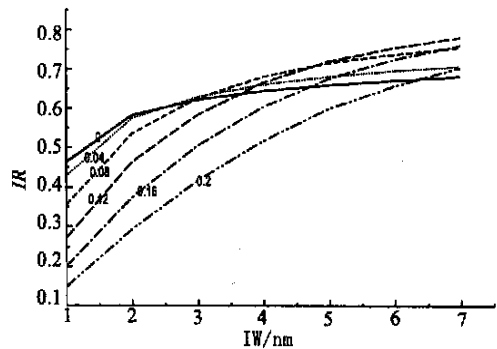


图 4 积分反射率随积分波段的变化曲线
Fig.4 Relationship between integrated reflectivity and integrated waveband

多层膜在不同波段内的积分反射率受膜厚随机控制误差的影响不一样。图 4 给出了不同膜厚随机控制误差下的积分反射率 (IR) 与积分波段 (IW) 的关系曲线。不难看出随着积分波段的逐渐增大, 积分反射率受膜厚随机控制误差的影响越来越小。该曲线也表明对于要求某一波长下多层膜反射率高(如 X 射线激光用多层膜)的多层膜, 膜厚随机控制误差对多层膜性能影响非常显著, 而对于那些只用一块多层膜的应用来说, 膜厚随机控制误差对这样应用没有多大影响。

2.2 膜厚系统控制误差对多层膜性能影响

实际镀膜时膜厚系统控制误差的膜厚的变化形式为:

$$d = d_0 + \nabla, \quad (2)$$

∇ 表示膜厚系统控制误差, 也就是说膜系中每层的误差量相同。这种误差会引起反射率峰值的偏移。图 5 给出了 $\nabla = -0.5, 0.2, 0.5$ nm 时, 多层膜的反射率曲线。由图 5 可以看出膜厚系统控制误差愈大, 峰值反射率偏移愈严重, 而且误差量的正负决定了偏移的方向。由于多层膜带宽非常窄, 峰值的少许偏离就可能导致某些特殊要求的光学元件(例如 X 射线激光用多层膜)不能工作。

参考文献:

- [1] DICICCO D S, KIM D S, ROSSER R S, *et al.* First stage in the development of a soft X-ray reflection imaging microscope in the Schwarzschild configuration using a soft X-ray laser 18.2 nm[J]. *Opt Lett*, 1992, (2), 17:157-159.
- [2] BJOR KHOLM J E, BOKER J, EICHNER L, *et al.* Reduction printing at better than 0.1 μm resolution using 14 nm radiation and multilayer-coated optics[J]. *J Vac Sci Technol : B*, 1990, 8(6) :1509-1513.
- [3] WINDT D L, WASKIEWICZ W K. Multilayer facilities required for extreme-ultraviolet lithography [J]. *J Vac Sci Technol : B*, 1994, 12(6) : 3826-3832.
- [4] CEGLIO N M. Multilayer structures for X-ray laser cavities[J]. *SPIE*, 1985, 563:360-366.
- [5] BROWN C. Imaging of laser-produced plasmas at 44A using a multilayer mirror[J]. *Opt Comm*, 1988, 68(3) :190-195.
- [6] JOENSEN K D, H ϕ GH ϕ J P, CHRISTENSEN F, *et al.* Multilayered supermirror structures for hard X-ray synchrotron and astrophysics instrumentation[J]. *SPIE*, 1993, 2011:360-372.
- [7] 张俊平, 曹健林, 马月英, 等. 软 X 光激光用多层膜反射镜的设计与性能模拟计算[J]. *光学学报*, 1995, 15(8) :1089-1093.
ZHANG J P, CAO J L, MA Y Y, *et al.* The design and performance simulation of multilayered mirrors for soft X-ray lasers[J]. *Acta Optica Sinica*, 1995, 15(8) :1089-1093. (in Chinese)
- [8] STEARN D G. X-ray scattering from interfacial roughness in multilayer structures[J]. *J Appl Phys*, 1992, 71(14) :4286-4298.

作者简介:王占山(1963 -),男,吉林东辽人,博士,研究员,博士生导师,从事紫外与软 X 射线元件和系统方面的研究。

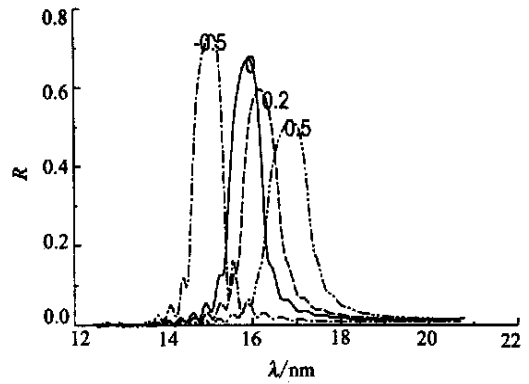


图 5 系统误差对多层膜反射率的影响

Fig. 5 Reflectivities as functions of systematic error of multilayers

3 结 论

多层膜的性能受许多参数影响, 实际镀膜过程的膜厚控制误差也是多种因素的综合。从以上的分析和计算可以看出在多层膜制备过程中解决膜厚控制误差是最关键的问题。膜厚随机控制误差严重降低多层膜的反射率, 但不改变峰值波长的位置。膜厚系统控制误差会使多层膜的峰值反射波长发生偏离, 但对反射率的影响不大。