

宽带平坦型软 X 射线多层反射膜的设计*

柯常军¹ 王占山² 郑咏梅¹ 张铁强¹ 曹健林² 陈星旦²

(1 吉林工业大学应用物理系 长春 130025)

(2 中国科学院长春光学精密机械研究所应用光学国家重点实验室 长春 130022)

摘 要 提出一种宽带平坦型软 X 射线多层反射膜的设计方法。给出了 18nm-20nm 波段的设计结果, 整个波段的反射率与 25% 的最大偏差小于 1.5%。这种方法对于软 X 射线波段的成像、光谱分析等应用有重要意义。

关键词 平坦 软 X 射线多层膜 随机数 评价函数

1 引 言

软 X 射线多层膜是软 X 射线光学的关键元件, 目前这个领域的主要研究是围绕如何获得高反多层膜展开的。当然在这方面已经取得了许多令人振奋的结果, 如在 13nm 附近已研制出了反射率高达 66% 的 Mo/Si 多层膜^[1-2]。由于这些多层膜是针对某一特定波长的周期膜, 因而在相邻波长范围内反射率下降很快, 这种窄带特性在许多应用中极为不利。在某些光学系统(主要用于卫星的光学成像装置)中, 需要某个波段所有波长的入射光尽可能得到相同程度的反射, 从而使整个波段的反射光谱均匀。这就需要一种宽带平坦的软 X 射线多层反射膜。对于无吸收的介质, 只需把若干窄带高反膜系依次叠加在一起, 就能得到所需的宽带平坦高反多层膜(例如中子膜^[3])。而在软 X 射线区, 由于所有介质都存在吸收, 因而问题变得复杂起来。迄今只有 Loevezijn^[4]报道了 15nm-17nm 波段的这种宽带 Mo/Si 多层膜, 整个波段的理论反射率在 30% 左右, 波动小于 5%。国内这方面的研究还未见报道, 本文介绍一种平坦优化法, 在 18nm-20nm 波段得到反射率为 25%, 波动小于 1.5%。

* 本工作为国家自然科学基金和激光青年基金资助项目

收稿日期: 1998-11-11

2 多层膜的设计原则

多层膜的反射规律和理想晶体的布喇格反射规律很相似,平坦型多层膜要求在整个波段有较高且平坦的反射率,因此进行优化之前必须选取合适的薄膜材料、膜厚以及层对数。多层膜通常采用两种材料交替的结构,薄膜材料应同时有尽可能低的吸收和尽可能大的光学常数差别^[5]。另一种著名的高低 Z 选材方法^[6],在实际应用中并不很准确。因为高 Z 、低 Z 材料的光学性能随波长显著变化,相反原子序数相差并不很大的材料可能有很好的光学性能。除此之外,薄膜材料还必须有相对稳定的物理和化学性质。为了获得最好的反射率,周期膜膜厚的选择应遵循布喇格条件:

$$\lambda = 2d \sin \theta \quad (1)$$

最佳周期厚度由于两种材料的吸收系数不同与(1)式确定的值略有偏离。对宽带平坦多层膜,为保证整个波段内均有较高的反射率,而波段外只有较低的反射率,膜系的层对厚度变化范围不宜过大。另外由于薄膜材料的吸收,使得膜系下面的膜层(靠近基底)对反射率的贡献远小于上面的膜层。因而实际参加反射的膜层数是有限的,应综合制备条件选择适当的层对数。

3 18nm–20nm 波段宽带平坦多层膜的优化设计

根据以上设计原则,由于 Mo/Si 在 12.5nm–22nm 被公认为是目前最好的多层膜材料^[7],我们以 18nm–20nm 波段的正入射 Mo/Si 多层膜(20 个周期)为例介绍这种平坦优化

法。为了设计出最平坦的多层膜,和其它优化方法一样,最重要的是找到一种合适的评价函数使设计结果与目前误差最小。即尽可能使此波段的反射率接近一常数。我们选取两种不同的评价函数

$$F_1 = \sum_{\lambda} \sqrt{(R_{\lambda} - M)^2}$$

$$F_2 = \sum_{\lambda} (R_{\lambda} - M)^2$$

R_{λ} 是 18nm–20nm 波段各波长所对应的反射率, M 为参考反射率。

我们从峰值反射率在中心波长 19nm 处的周期膜($d_{\text{Mo}} = 3.10\text{nm}$, $d_{\text{Si}} = 6.78\text{nm}$)开始优化,采用的光学常数来源于文献^[8],并经拉格朗日插值法得到。反射率的计算采用了菲涅耳公式的循环递推法^[9]。然后使 Mo_0, Si 层厚在一定范围内根据下式变化

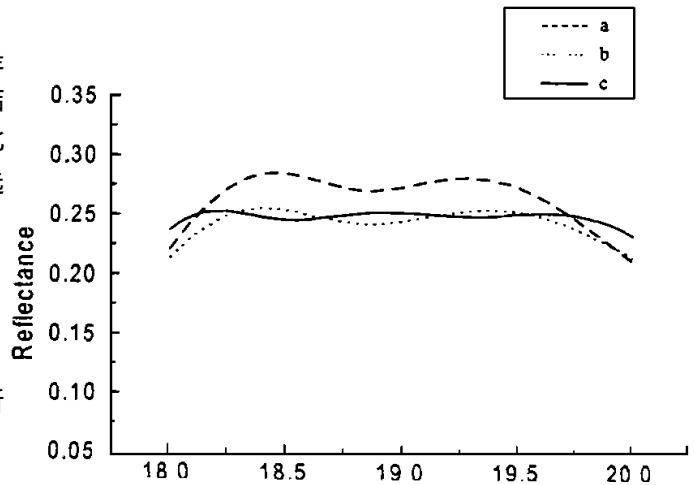


Fig. 1 The flattest reflectance curve by various functions (F) and various reference reflectance (M). curve(a) $F = F_2$, $M = 30\%$; curve(b) $F = F_1$, $M = 25\%$; curve(c) $F = F_2$, $M = 25\%$

$$d^{(k)} = d_0^{(k)} (1 + \eta R^{(k)}) \quad (2)$$

其中 $R^{(k)}$ 是属于 $[-1, 1]$ 之间的均匀分布随机数, η 是随机因子, $d_0^{(k)}$ 为周期膜的第 k 层厚度, η 的取值不宜过大, 这样做是为了保证整个波段内均有较高的反射率。先给一个较大的 η 值, 使 $d_{Mo}^{(k)}$ 、 $d_{Si}^{(k)}$ 经一系列随机组合变化后, 留下评价函数值最小的膜系, 并将其每层的厚度 $d^{(k)}$ 代替(2) 式中的 $d_0^{(k)}$, 再给一个较小的随机因子 η , 重复以上过程, 经多次循环后最终能找到与参考反射率最接近的平坦膜系。图 1 中曲线(a) 是采用评价函数 F_2 、参考反射率为 30% 的最优结果, 整个波段反射率与 30% 的最大偏差 $< 8\%$, 为了得到此波段真正最平坦的反射率曲线, 需要不断变化参考反射率 M 。总的使反射率从较大值逐渐的变化到所能容忍的最小反射率(因为过低的反射率将无意义)。我们使 M 从 35% 变化到 20%, 每次变化 5%, 得到最平坦的反射率曲线在 $M = 25\%$ 时, 整个波段反射率与参考反射率的最大偏差 $< 1.5\%$ 。不难看出获得平坦的反射率的同时牺牲了峰值反射率。图 1 中曲线(b) 是采用评价函数 F_1 的优化结果, 曲线(c) 是采用评价函数 F_2 的最优结果。很容易看出 c 曲线比曲线 b 平滑, 原因是两种不同的评价函数的变化速度不一样, 因而平滑程度不同。表 1 给出了采用评价函数 F_2 最佳设计的层厚。可看出膜厚的变化相当复杂, 因此给制备工作带来了更大的难度。

Table 1. The optimal design result of Mo/Si multilayer for broadband and flat reflection

bilayer number	bilayer thickness(nm)	bilayer number	bilayer thickness(nm)
1	9.73	11	8.76
2	10.63	12	5.72
3	10.06	13	5.66
4	10.23	14	10.39
5	11.02	15	7.65
6	9.17	16	8.37
7	9.89	17	8.30
8	7.68	18	9.77
9	7.92	19	11.20
10	11.16	20	7.87

4 讨论与结论

不难看出设计结果的好坏与评价函数的优劣有很大关系, 应选取与目标偏差最小的评价函数。在实际使用时, 要顾及各种要求选择适当的评价函数。例如为了获取最大的积分反射率(光通量), 可以采用评价函数 $F' = \sum_{\lambda} R_{\lambda}$, 使之最大。有时根据不同需要, 还可以把几种评价函数经线性组合后构成综合评价函数。如在要兼顾反射率和光谱均匀度时, 可采用下面的评价函数:

$$F = \alpha_1 \sum_{\lambda} R_{\lambda} + \alpha_2 \sum_{\lambda} (R_{\lambda} - M)^2$$

其中 α_1, α_2 是适当的权重因子。

本文介绍了一种平坦优化方法, 这种方法的关键是找到一种合适的评价函数。运用此方法可在软 X 射线区任意较宽波段进行最平坦的多层膜设计, 这项工作对软 X 射线波段的成

像、光谱分析将是十分有意义的。给出了 18nm–20nm 波段最平坦多层膜的设计结果, 整个波段反射率与参考反射率的最大偏离小于 1.5%。由于膜层的不规整性, 对镀膜条件提出了更高的要求。

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: 69526960
- 2 Gutman G. High performance Mo/Si and W/B₄C multilayer mirrors for soft X ray imaging optics. *J X ray Sci Technol*, 1994, 4: 142150
- 3 Hayter J B, Mook H A. Discrete thin film multilayer design for X ray and neutron supermirrors, *J Appl Crystallogr*, 1989, 22: 3541
- 4 Loevezijn P Van, Schlatmann R. Numerical and experimental study of disordered multilayers for broadband X ray reflection. *Appl Opt*, 1996, 35(19): 36143619
- 5 Yamamoto M, Cao J, Namioka T. Optical criterion for the selection of material pairs for high reflectance soft X ray mirrors. *Proc SPIE*, 1989, 1140: 448452
- 6 Michette A G. *Optical systems for soft X rays*. New York: Plenum Press, 118
- 7 Ceglio N. Revolution in X ray optics. *J X rays Sci Technol*, 1989, 1: 778
- 8 曹健林. 软 X 射线波段(60~900eV) 光学常数测定及多层膜反射镜的设计、制备:[博士学位论文]. 长春: 中国科学院长春光机所, 1989
- 9 Parratt L G. Surface studies of solids by total reflection of X rays *Phys Rev*. 1954, 95: 359368

The Design of Soft X-ray Broadband and Flat Multilayer

KE Chang-Jun, ZHENG Yong-Mei, ZHANG Tie-Qiang

(*Department of Applied Physics, Jilin University of Technology, Changchun 130025*)

WANG Zhan-Shan, CAO Jiar-Lin, CHEN Xing-Dan

(*The State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Science, Changchun 130022*)

Abstract

A technique used for designing soft X-ray multilayer for broadband and flat reflection has been developed. As an example, we present design result calculation in the 18nm–20nm spectral range. In the range the maximum deviation from 25% reflectivity level is less than 1.5%. It is very important for spectrum imaging and spectrum analysis.

Key words: Flat, Soft X-ray multilayers, Random number, Merit function

柯常军 男, 1973年1月出生。工学硕士, 现阶段主要从事软 X 射线多层膜研究。已考上中科院电子学所物理电子学专业博士。