

# 软 X 射线多层反射膜的一种新型设计方法\*

柯常军<sup>1</sup> 王占山<sup>2</sup> 张铁强<sup>1</sup> 曹健林<sup>2</sup> 陈星旦<sup>2</sup>

(<sup>1</sup>吉林工业大学应用物理系 长春 130025)

(<sup>2</sup>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** 在循环递推法基础上加入随机数运算, 得到一种简易、精度高、有较高实用价值的多层发射膜设计方法。给出了设计步骤, 进行了一系列多层膜设计。通过比较, 这种方法与复振幅平面法所得结果非常接近, 甚至有的多层膜的设计结果更好。

**关键词** 软 X 射线 多层膜 随机数

## 1 引言

近年来, 随着多层膜技术相关技术的迅速发展, 多层膜被广泛用于软 X 射线投影光刻、显微术、天文学和原子物理学等领域<sup>[1-3]</sup>, 是软 X 射线波段的一种重要光学元件, 因而成为一个研究热点。目前使用的高反射多层膜设计方法大致有循环递推法<sup>[4]</sup>, 矩阵法<sup>[5]</sup>和复振幅平面法<sup>[6]</sup>等。这些设计方法都旨在找到某一波长下反射率最高的膜层材料厚度, 从而设计出高反多层膜。本文给出一种新的反射膜设计方法, 其基本思想是在给定光学常数条件下, 设高低 Z 材料的膜厚分别为  $d_H$ 、 $d_L$ , 相应折射率分别  $n_H$ 、 $n_L$ 。先给膜厚  $d_H$ 、 $d_L$  一个初始值, 通过加随机数由计算机进行逐层搜索最终找到反射率最大值, 也就得到了最佳周期厚度  $d_{opt}$  和比例因子  $\tau_{opt}$  ( $\tau = d_H/d_H + d_L, d = d_H + d_L$ )。这种方法有设计思想简单, 设计结果可靠等特点。由于近年来计算机速度有很大提高, 此方法不失为一种实用的设计方法。我们先给出设计理论, 然后进行一系列多层膜设计, 并把设计结果同复平面法的设计结果进行比较, 可看出在相近波长下有相似的最高反射率, 并在某些波长有更好的设计结果。

## 2 软 X 射线多层反射膜的设计

由于所有物质在  $\lambda < 100\text{nm}$  范围内均有吸收, 故振幅反射率应为复数。对软 X 射线波段

\* 本项目得到国家自然科学基金和激光青年基金资助

(1 ~ 30nm), 薄膜材料复折射率为  $n = 1 - \delta - i\beta$ ,  $\delta$ ,  $\beta$  分别为相位因子、吸收因子,  $\delta \sim 10^{-2} - 10^{-5}$ ,  $\beta \sim 10^{-2} - 10^{-6}$ ,  $\delta = \rho k f_1 / A$ ,  $\beta = \rho k f_2 / A$ ,  $k = r_e \lambda^2 NA / 2\pi$ ,  $\rho$  为物质密度,  $A$  为原子质量,  $r_e$  为经典电子半径,  $NA$  为阿佛加德罗常数,  $f_1, f_2$  为原子散射因子<sup>[7]</sup>。由于正入射时光强反射率约为  $10^{-4} - 10^{-6}$ , 因此需要使用多层膜通过干涉加强来提高反射率。一般多层膜采用高  $Z$  和低  $Z$  材料的周期形式, 通常的周期多层膜结构如图 1 所示。

理想多层膜界面反射系数<sup>[8]</sup> 由菲涅耳公式给出:

$$r_j^s = \frac{n_j \sin \theta - n_{j+1} \sin \theta_{j+1}}{n_j \sin \theta + n_{j+1} \sin \theta_{j+1}} \quad (\text{s 偏振}) \quad (1)$$

$$r_j^p = \frac{n_{j+1} \sin \theta - n_j \sin \theta_{j+1}}{n_{j+1} \sin \theta + n_j \sin \theta_{j+1}} \quad (\text{p 偏振}) \quad (2)$$

$\theta_j$  为第  $j$  界面层入射复角的余角, 其值由斯涅耳定律的变形公式

$$n_j \sin \theta_j = (n_j^2 - \cos^2 \theta)^{1/2} \quad (3)$$

很容易求得。第  $j$  层界面的反射振幅<sup>[8]</sup>

$$x_j = \frac{r_j + x_{j+1} \exp(-i2\varphi_j)}{1 + r_j x_{j+1} \exp(-i2\varphi_j)} \quad (4)$$

其中  $\varphi_j = 2\pi n_H d_H \sin \theta_j / \lambda$  (当  $j$  为奇数时),  $\varphi_j = 2\pi n_L d_L \sin \theta_j / \lambda$  (当  $j$  为偶数时)。

我们假定在基底界面无反射 (即  $x_{2N+1} = 0$ ), 通过循环使用 (4) 式, 最后我们得到  $x_1$ , 对无偏振光入射时, 总反射率为

$$R = (R_s + R_p) / 2 = (|x_1^s|^2 + |x_1^p|^2) / 2 \quad (5)$$

从以上反射率  $R$  的推导过程可知在给定光学常数和入射角条件下, 以某个特定波长的 X 射线光入射,  $d_H, d_L$  (即  $\tau, d$ ) 对多层膜的整体反射率起着决定性作用。我们以下的工作就是要找到一对合适的  $d_H, d_L$  与传统方法不同的是我们既不固定  $d$ , 也不固定  $\tau$ 。我们先给定  $d_H, d_L$  一个初始值  $d_{H0}, d_{L0}$ 。我们统一设  $d_{H0} = d_{L0} = d_0 / 2$  (即  $\tau = 1/2$ )。同时为了减少计算机搜索次数, 可以根据布啦格公式  $2d \sin \theta = n\lambda$  来给定初始值  $d_0$  (例如正入射时, 可令  $d_{H0} = d_{L0} = N\lambda/4$ )。然后根据以下两式变化  $d_H, d_L$

$$d_H = d_{H0}(1 + \Theta S_H) \quad (6)$$

$$d_L = d_{L0}(1 + \Theta S_L) \quad (7)$$

$S_H, S_L$  是区间  $[-1, 1]$  之间的均匀分布随机数,  $\Theta$  是随机变化因子。先给定一个  $\Theta$ , 按 (6) 式、(7) 式对  $d_{H0}, d_{L0}$  分别加入一个随机数序列, 其中一个作为外循环, 另一个作为内循环。经计算比较用反射率极大值所对应的  $d_H, d_L$  代替  $d_{H0}, d_{L0}$ , 然后使用较小  $\Theta$  的重复以上计算过程。直到得到反射率最大值为止, 对应的  $d_H, d_L$  就是最佳膜层厚度。值得注意的是  $\Theta$  的变化规律是由大至小, 目的是使  $d_H, d_L$  朝着最佳方向变化, 而且最大的  $\Theta$  不宜过大。由 (6) 式和 (7) 式可看出  $\Theta$  原则上不应大于 1, 否则就可能得出错误结果。一般取最大的  $\Theta$  为 1。

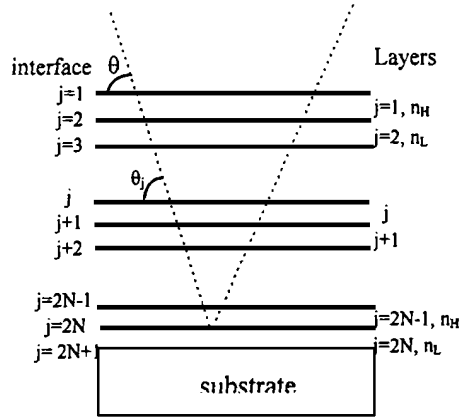


Fig. 1 The schematic diagram of peroded multilayer

### 3 应用与比较

以上我们从原理上介绍了这种设计方法, 现在用这种设计方法来设计一些激光波长下正入射多层反射膜。计算中的光学常数取自文献[9],[10]。这里  $\Theta = (i/5)^2, i = 5, 4, 3, 2, 1$ 。同样采用这种形式只是减缓  $\Theta$  的变化, 例如  $\Theta = (i/10)^2, i = 10, 9, \dots, 1$ , 但是结果并没有多大改善。当然  $\Theta$  可以采取别的变化形式诸如  $\Theta(i/5), (i/5)^3$ , 但设计结果不是很理想。 $S_H, S_L$  取自一个 100 个随机数的序列, 组成 10000 个组合, 总共做了 50000 次运算。模拟计算结果均很好, 接近最大值。表 1 列出了使用随机数方法的高反膜设计结果。包括镀膜材料、周期厚度、膜层数、理论所达到的最大反射率。表 2 是使用复平面光滑连接法的高反膜系设计结果<sup>[11]</sup>。比较表 1、表 2, 可看出它们的设计结果非常相似。甚至有的波长(如表中带\*号的行, 它们的光学常数完全相同)表 1 的设计结果明显好于表 2 的设计结果。

**Table 1 The designed results by random number method**

wavelength(nm)	material	number of layers	period thickness(nm)	theoretical reflectance
22.8	M o/ Si	30	12.07	30.2%
21.8	M o/ Si	30	11.55	34.4%
20.7	M o/ Si	30	10.82	33.5%
19.5	M o/ Si	30	10.12	37.3%
18.0	M o/ Si	40	9.36	45.5%
15.5	M o/ Si	50	7.98	67.3%
13.0	M o/ Si	80	6.73	74.5%
10.2	Ru/ C	100	5.32	50.1%
* 8.1	Ru/ C	100	4.11	33.3%
5.5	Ni/ C	400	2.75	41.3%
* 4.6	Ni/ C	400	2.31	47.6%

**Table 2 The designed results by layer by layer method**

wavelength(nm)	material	number of layers	period thickness(nm)	theoretical reflectance
23.4	M o/ Si	31	12.43	29.9%
22.0	M o/ Si	31	11.61	33.4%
20.8	M o/ Si	31	10.92	36.3%
19.6	M o/ Si	31	10.26	39.3%
18.2	M o/ Si	41	9.50	44.4%
15.6	M o/ Si	51	8.07	54.0%
13.2	M o/ Si	81	6.77	61.0%
10.6	Ru/ C	99	5.50	51.3%
* 8.1	Ru/ C	101	4.12	32.1%
5.4	Ni/ C	401	2.72	39.5%
* 4.6	Ni/ C	401	2.31	46.0%

### 4 结 论

由于计算机速度的不断提高, 通过加入随机数得到一种有效、快速、简单的设计方法。除用

于常用的高反周期膜系设计外, 它还可用于具有特殊用途的非周期多层膜, 这部分工作我们将另文发表。

### 参 考 文 献

- 1 Windt D L, Waskiewicz W K. Multilayer facilities required for extreme-ultraviolet lithography. *J Vac Sci Technol B*, 1994, 12( 6) : 3826 ~ 3832
- 2 Kirz Janos, Rarback Harvey. Soft X-ray microscopes. *Rev sci Instrum*, 1985, 56(1): 1 ~ 12
- 3 Joensen K D, Høgh P. Multilayered supermirror structures for hard X-ray synchrotron and astrophysics instrumentation. *Proc SPIE*, 2011: 360 ~ 372
- 4 Berning P H. Theory and methods of evaluation of the properties of thin films. in: G. Hass( ed. ), *Optics of Thin Films*, Bellingham, USA, 1, Mir Moscow, 1967: 28 ~ 31
- 5 Born M, Wolf E. *Principles of Optics*. Pergamon, 1975: 28 ~ 31
- 6 Yamamoto Masaki, Namioka Takeshi. Layer by layer design method for soft X-ray multilayers. *App Opt*, 1992, 31(10) : 1622 ~ 1627
- 7 Henke B L. Scattering factors and mass absorption coefficients. in *X-ray Data Booklet*, Vaughan D, ed. ( Lawrence Berkeley Laboratory, Berkeley, Calif. ) 1986: 2. 28 ~ 2. 34
- 8 Born M, Wolf E. *Principle of optics*. pergamon, Oxford, 1989: 40
- 9 Henke B L, Lee P, Tanka J, et al. Low-energy X-ray interaction coefficient, photoabsorption, scattering and reflection  $E = 1000 \sim 2000, z = 1 \sim 94$ . *At. Data Nucl. Data Tables* 27, 1982: 1 ~ 144
- 10 Windt D L. XUV optical constants of single-crystal GaAs sputtered C, Si,  $Cr_3C_2$ , Mo, and W. *Appl Opt*, 1991, 30( 1) : 15 ~ 19
- 11 张俊平等. 软 X 光激光用多层膜反射镜的设计与性能模拟计算. *光学学报*, 1995, 15( 8) : 1089 ~ 1091

## The Design of Multilayered Mirrors as Reflector for Soft X-rays by Random Number

KE Chang-Jun<sup>1</sup>, WANG Zhan-Shan<sup>2</sup>, ZHANG Tie-Qiang<sup>1</sup>, CAO Jian-Lin<sup>2</sup>, CHEN Xing-Dan<sup>2</sup>  
 (1 *Department of Applied Physics, JiLin University Technology, Changchun 130025*)  
 (2 *The State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Science, Changchun 130022*)

### Abstract

In this paper, a new design method of multilayered mirrors as reflector for soft X-rays is proposed. It based on the traditional recurrence relation method, with calculation of random numbers. The technique gives a high accuracy and it is easy to operate, so it has practical value in production. This paper gives the design step and a series of results designed by this method. It is similar to that designed by layer-by-layer method, even better at some wavelengths.

**Key words:** Soft X-ray, Multilayered mirrors, Random number

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