

常用材料软 X 射线多层膜的全波段设计*

邵建达 易 葵 范正修 王润文

(中国科学院上海光机所光学薄膜中心 上海 201800)

提要 利用薄膜光学理论及材料在软 X 射线波段的原子散射因子, 设计了大批量的软 X 射线多层膜的计算程序, 对常用材料的膜系配对进行了优化设计, 给出的结果对软 X 射线整个波段内的多层膜膜系的选择有一定的指导意义。

关键词 软 X 射线多层膜, 反射率, 多层膜设计

1 引 言

软 X 射线多层膜在很多波长上获得了一些良好的反射率效果^[1~4]。综观 X 射线多层膜研究情况, 可以发现其多层膜膜系中所用的材料基本上是局限于一些十分常用的材料上, 例如 Mo, Si, Co, Ni, W, C, B 等。本文从 Henke 给出的材料在软 X 射线波段中的最新散射因子^[5]出发, 利用薄膜光学理论设计了在整个软 X 射线波段进行大批量膜系设计的程序, 给出了常用材料的多层膜膜系的优化结果, 修正了早期 X 射线全波段各种波长的膜系材料选择的报道^[6~9], 并对整个软 X 射线波段(1~ 30 nm) 内的多层膜制备时实际选择膜系有一定的指导意义。

2 设计结果

本文以图表的形式给出了以间隔层材料分类的具体膜系设计结果。间隔层材料包括 C, Si, B, Be4 种。而反射层材料则使用了 Mo, Al, Pt, W, Ni, Ta, Cu, Co, Zn。设计中所有的膜系其入射角度为 0°, 膜层数为 201 层。从散射因子变换到光学常数时引入的材料密度为块状材料的密度。

设计结果的正确性可以从实际制备结果的对比中得到验证^[10], 本文不再特别进行讨论。

2.1 C 基多层膜设计结果

图 1 是以 C 为间隔层材料与常用的 9 种金属材料配对后的优化设计结果。从图中可以看出, 以 C 为间隔层的多层膜其主要性能是在 4.36 nm 波长上的反射特性。

表 1 给出的是 4.36 nm 波长上的反射率设计结果, 显示出在此波长上 Co/C 膜系具有最高的反射率。

* 国家自然科学基金基金(编号: 69587009)资助项目)。

收稿日期: 1998-05-14; 收到修改稿日期: 1998-06-25

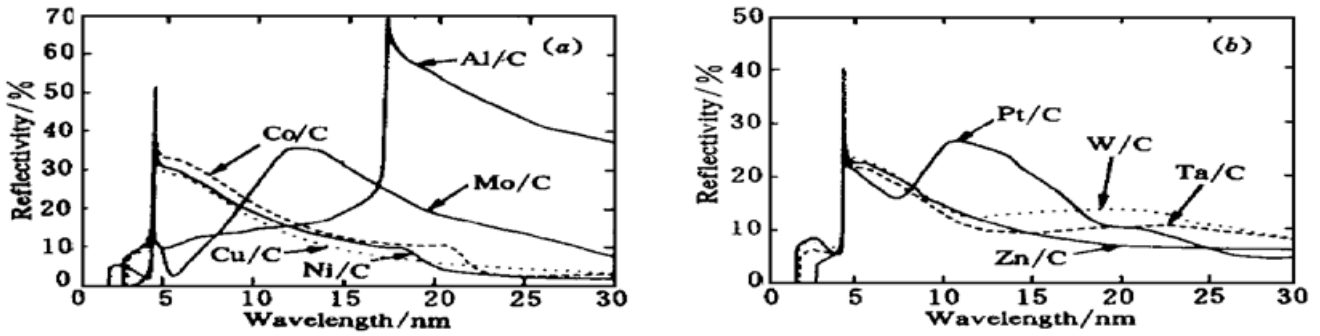


图 1 C 作为间隔层与 9 种金属材料组合而成的膜系在 1~ 30 nm 波段内的优化设计结果

Fig. 1 The theoretic reflectivity of the C-based multilayers combined with 9 metal materials

(a) Al, Co, Cu, Mo, Ni; (b) Pt, Ta, W, Zn

表 1 C 基多层膜在其特征反射峰上(波长为 4.36 nm)的优化设计结果

Table 1 The theoretic reflectivity of the C-based multilayers at 4.36 nm

| Multilayers | Wavelengths/nm | Reflectivity/% | Layer thickness/nm/nm |
|-------------|----------------|----------------|-----------------------|
| Al/C | 4.36 | 34.71 | 0.903/1.277 |
| Co/C | | 51.48 | 0.759/1.422 |
| Cu/C | | 45.70 | 0.696/1.483 |
| Mo/C | | 19.22 | 0.728/1.448 |
| Ni/C | | 47.15 | 0.693/1.486 |
| Pt/C | | 30.62 | 0.597/1.579 |
| Ta/C | | 33.35 | 0.617/1.559 |
| W/C | | 19.22 | 0.728/1.448 |
| Zn/C | | 40.26 | 0.735/1.444 |

2.2 Si 基多层膜设计结果

图 2 是以 Si 为间隔层材料与常用的 9 种金属材料配对后的优化设计结果。从图中可以看出,以 Si 为间隔层的多层膜其主要性能是在 12.44 nm 波长上的反射特性。

表 2 给出的是在 12.44 nm 波长上的反射率设计结果,显示出在此波长上 Mo/Si 膜系具有最高的反射率。

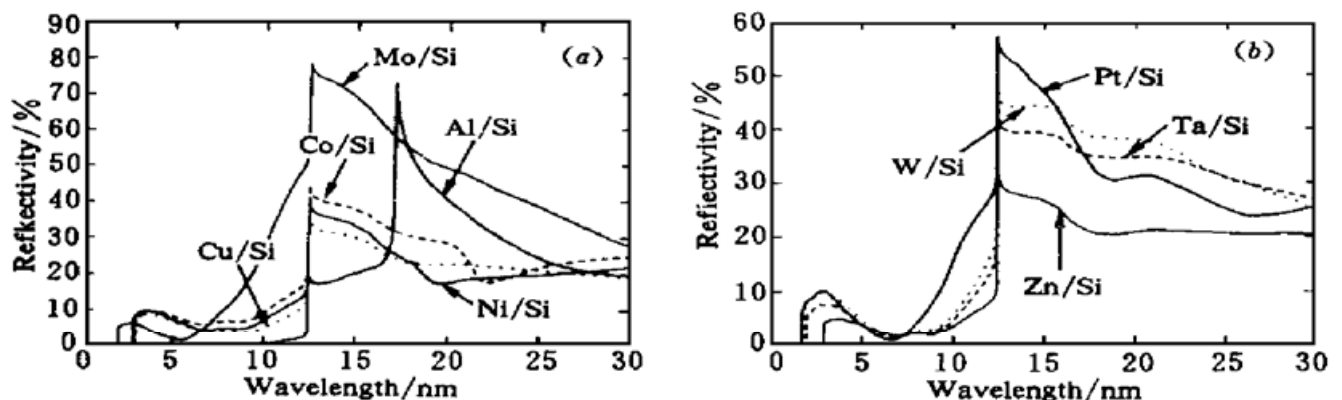


图 2 Si 作为间隔层与 9 种金属材料组合而成的膜系在 1~ 30 nm 波段内的优化设计结果

Fig. 2 The theoretic reflectivity of the Si-based multilayers combined with 9 metal materials

(a) Al, Co, Cu, Mo, Ni; (b) Pt, Ta, W, Zn

表 2 Si 基多层膜在其特征反射峰上(波长为 12.44 nm)的优化设计结果

Table 2 The theoretic reflectivity of the Si-based multilayers at 12.44 nm

| Multilayers | Wavelengths/nm | Reflectivity/% | Layer thickness/nm/nm |
|-------------|----------------|----------------|-----------------------|
| Al/Si | 12.44 | 21.14 | 1.52/4.61 |
| Co/Si | | 44.28 | 1.22/4.92 |
| Cu/Si | | 36.02 | 1.22/4.92 |
| Mo/Si | | 78.27 | 2.43/3.83 |
| Ni/Si | | 40.09 | 1.19/4.95 |
| Pt/Si | | 57.12 | 1.38/4.79 |
| Ta/Si | | 44.12 | 1.41/4.74 |
| W/Si | | 48.32 | 1.42/4.74 |
| Zn/Si | | 32.76 | 1.25/4.88 |

2.3 B 基多层膜设计结果

图 3 是以 B 为间隔层材料与常用的 9 种金属材料配对后的优化设计结果。从图中可以看出,以 B 为间隔层的多层膜其主要性能是在 6.69 nm 波长上的反射特性。

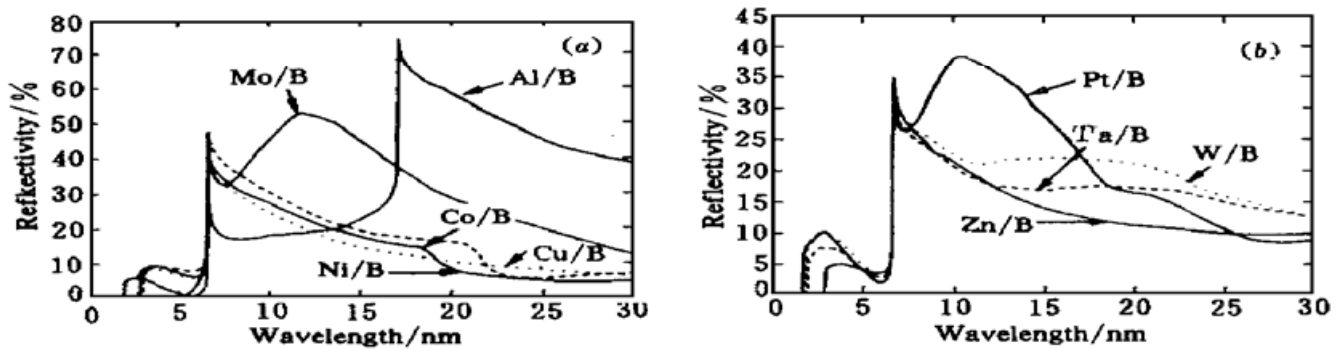


图 3 B 作为间隔层与 9 种金属材料组合而成的膜系在 1~30 nm 波段内的优化设计结果

Fig. 3 The theoretic reflectivity of the B-based multilayers combined with 9 metal materials

(a) Al, Co, Cu, Mo, Ni; (b) Pt, Ta, W, Zn

表 3 B 基多层膜在其特征反射峰上(波长为 6.69 nm)的优化设计结果

Table 3 The theoretic reflectivity of the B-based multilayers at 6.69 nm

| Multilayers | Wavelengths/nm | Reflectivity/% | Layer thickness/nm/nm |
|-------------|----------------|----------------|-----------------------|
| Al/B | 6.69 | 27.70 | 0.988/2.355 |
| Co/B | | 47.85 | 0.758/2.586 |
| Cu/B | | 40.46 | 0.683/2.659 |
| Mo/B | | 46.59 | 1.356/1.996 |
| Ni/B | | 42.18 | 0.720/2.685 |
| Pt/B | | 31.46 | 0.853/2.488 |
| Ta/B | | 32.04 | 0.775/2.566 |
| W/B | | 33.33 | 0.739/2.602 |
| Zn/B | | 34.79 | 0.765/2.576 |

表 3 给出的是在 6.69 nm 波长上的反射率设计结果,显示出在此波长上 Co/B 膜系具有最高的反射率

2.4 Be 基多层膜设计结果

图 4 是以 Be 为间隔层与常用的 9 种金属材料配对后的优化设计结果。从图中可以看出, 以 Be 为间隔层的多层膜其主要性能是在 11.11 nm 波长上的反射特性。

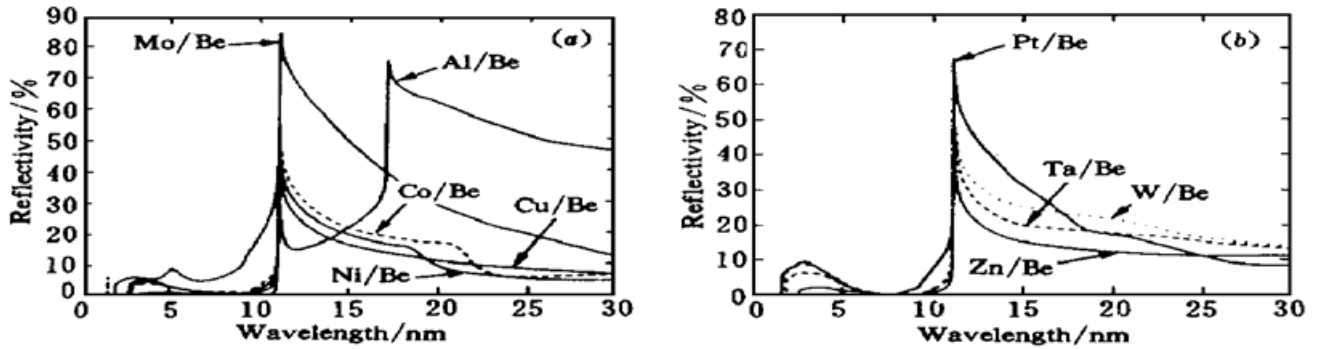


图 4 Be 作为间隔层与 9 种金属材料组合而成的膜系在 1~ 30 nm 波段内的优化设计结果

Fig. 4 The theoretic reflectivity of the Be-based multilayers combined with 9 metal materials

(a) Al, Co, Cu, Mo, Ni; (b) Pt, Ta, W, Zn

表 4 给出的是在 11.11 nm 波长上的反射率设计结果, 显示出在此波长上 Mo/Be 膜系具有最高的反射率。

表 4 Be 基多层膜在其特征反射峰上(波长为 11.11 nm)的优化设计结果

Table 4 The theoretic reflectivity of the Be-based multilayers at 11.11 nm

| Multilayers | Wavelengths/nm | Reflectivity/% | Layer thickness/nm/nm |
|-------------|----------------|----------------|-----------------------|
| Al/Be | 11.11 | 43.12 | 1.25/4.07 |
| Co/Be | | 55.31 | 1.09/4.24 |
| Cu/Be | | 55.31 | 1.09/4.24 |
| Mo/Be | | 84.04 | 2.25/3.21 |
| Ni/Be | | 51.46 | 1.05/4.27 |
| Pt/Be | | 67.16 | 1.32/4.03 |
| Ta/Be | | 55.26 | 1.23/4.10 |
| W/Be | | 57.01 | 1.23/4.10 |
| Zn/Be | | 46.69 | 1.09/4.22 |

3 讨论与结论

上述设计结果清楚表明, 在刚好高于间隔层材料的吸收限(也即在反射率-波长曲线上的垂直跃变所在的波长)波长上多层膜往往有良好的光学常数, 能给出这些波长最佳的反射率结果。这些波长构成了多层膜膜系在整个 X 射线波段的波谱上的特征反射率峰, 给出的最高反射率膜系分别为 12.4 nm 的 Mo/Si 多层膜为 78.27%; 11.11 nm 的 Mo/Be 多层膜为 84.04%; 6.69 nm 的 Co/B 多层膜为 47.85%, Mo/B 多层膜为 46.75%, Ni/B 多层膜为 42.18%; 4.36 nm 的 Co/C 多层膜为 51.48%, Ni/C 多层膜为 47.15%。为了对整个软 X 射线波段多层膜的膜系选择有一个明确显示, 图 5 给出了分波段的具有最高反射率的膜系, 表 5 给出了具体膜系对应的适用波段。

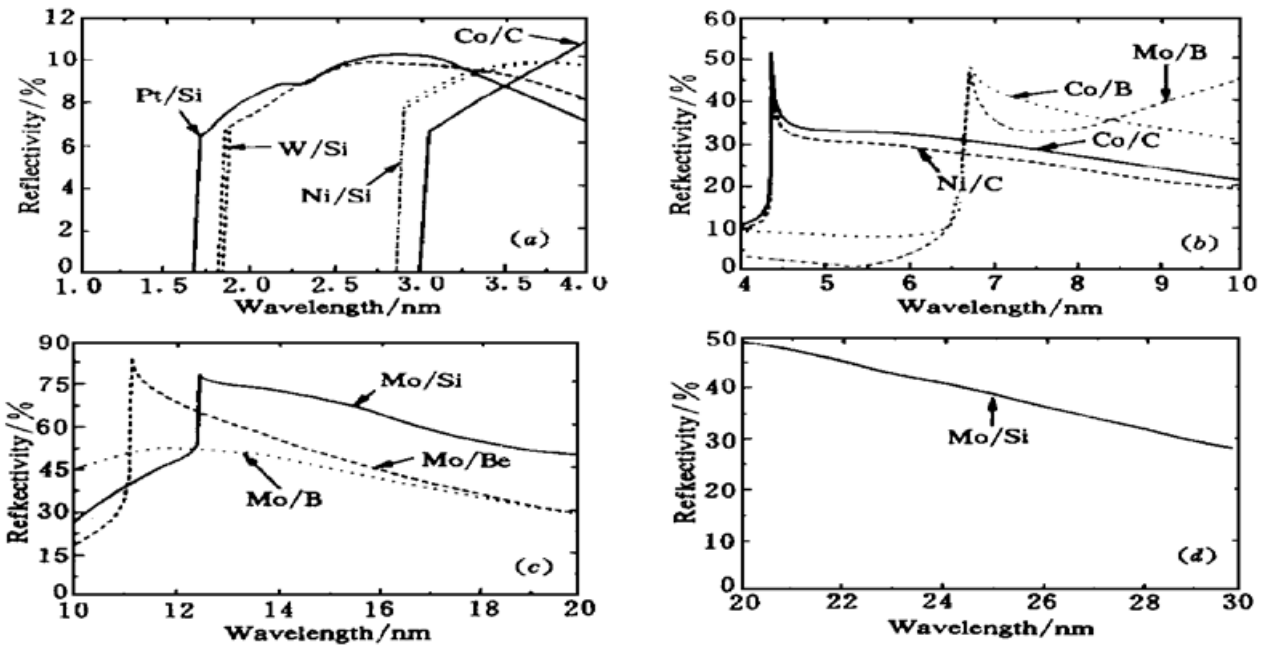


图 5 1~ 30 nm 范围内优化设计所得的最高反射率膜系组合分段结果

Fig. 5 The multilayers with the highest reflectivity in the wavelengths region 1~ 30 nm

表 5 整个软 X 射线波段内具有最高反射率的膜系及其对应波段

Table 5 The multilayers with the highest reflectivity in the whole wavelengths region of the soft X-ray

| | | | | | | | | | |
|-----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|
| Wavelengths /nm | 1 | 1. 68 | 3. 25 | 3. 58 | 3. 81 | 6. 69 | 8. 37 | 11. 11 | 12. 44 |
| | ~ | ~ | ~ | ~ | ~ | ~ | ~ | ~ | ~ |
| | 1. 68 | 3. 25 | 3. 58 | 3. 81 | 6. 68 | 8. 37 | 11. 10 | 12. 43 | 30 |
| Multilayers | | Pt/Si | W/Si | Ni/Si | Co/C | Co/B | Mo/B | Mo/Be | Mo/Si |

表 6 Al 与间隔层材料组合膜系在 17. 08 nm 波长上的反射率优化设计结果

Table 6 The theoretic design results of the Al/Si (C, B, Be) multilayers at 17. 08 nm

| Multilayers | Wavelengths/nm | Reflectivity/% | Layer thickness/nm/nm |
|-------------|----------------|----------------|-----------------------|
| Al/Si | | 72. 97 | 2. 57/3. 83 |
| Al/C | 17. 08 | 69. 21 | 5. 62/2. 74 |
| Al/B | | 73. 87 | 5. 21/3. 19 |
| Al/Be | | 74. 49 | 1. 25/4. 07 |

值得注意的是在 1~ 1. 68 nm 波段, 在这些材料中未能发现具有一定反射率的膜系。而且在小于 4. 36 nm 波段以下, 反射率最高仅为 10% 左右。除了表 5 上列出的膜系以外。各个波段还有一些膜系性能是相当的。特别要指出的是在 1~ 4 nm 波段内, B 与 Pt, W, Ni 组合的材料几乎和 Si 与相同材料组合的膜系具有极为一致的反射特性, 图 5 (a) 给出的 Pt/Si 曲线也就代表了 Pt/B 曲线, 而给出的 W/Si 与 Ni/Si 曲线几乎也是重合的。在图 5 (a) 上可以看到 W/Si 在该波段事实上有着相当大的反射带宽。特别值得注意的是在这些材料中, 长波段的膜系组合只有 Mo/Si 一个。当然在这个较长波段里, 比较高的反射率峰值是由 Al 与间隔层材料组成的。

表 6 给出了 Al 与间隔层材料配对组合成的膜系在波长为 17. 08 nm 时的反射率优化结

果。从中可以看到在 X 射线的长波段, Al 具有十分杰出的光学性能。事实上 17.08 nm 也就是 Al 本身略高于吸收限的波长, 从这点上说虽然 Al 是金属材料, 但其实际上的性能类似于间隔层材料。它与其他吸收材料的配对也能给出相近的反射率。但是由于 Al 化学性能的不稳定使得在实际制膜中很难得到实际的应用。

这些结果显示在软 X 射线波段, 在较短波长时, 理论给出了特征反射峰值。但在大于 20 nm 的波段, 还未发现有明显特征反射峰的材料出现。

从上述一系列的图表中可以看出, Mo 在相当大的波段范围内具有良好的光学特性。除了在 12.4 nm 是无可争议的首选膜系外, 除 4.36 nm 外, 其他波长都有与别的最好膜系相当的反射率。而 Co 与 Ni 则在短波段具有十分明显的应用前景, 与它们配对的材料中 B 的应用波长比 C 略长。11.11 nm 的 Mo/Be 膜系是整个软 X 射线波段中理论反射率最高的膜系组合, 但可惜的是 Be 特有的物理毒性使其应用受到限制。

参 考 文 献

- 1 D. G. Stearns, R. S. Rosen, S. P. Vernon. Multilayer mirror technology for soft-x-ray projection lithography. *Appl. Opt.*, 1993, **32**(34): 6952~ 6960
- 2 K. M. Skulina, C. S. Alford, R. M. Bionta *et al.*. Molybdenum/beryllium multilayer mirrors for normal incidence in the extreme ultraviolet. *Appl. Opt.*, 1995, **34**(19): 3727~ 3730
- 3 D. G. Stearns, R. S. Rosen, S. P. Vernon. Normal-incidence X-ray mirror for 7 nm. *Opt. Lett.*, 1991, **16**(16): 1283~ 1285
- 4 A. D. Akhsakhalyan, N. N. Kolachevsky, M. M. Mitropolsky. 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**: 516~ 520
- 5 B. L. Henke, E. M. Gullikson, J. C. Davis. X-ray interactions: Photoionization, scattering, transmission, and reflection at $E = 50\sim 30000$ eV, $Z = 1\sim 92$. *Atomic Data and Nuclear Data Tables*, 1993, **54**(2): 198~ 305
- 6 A. E. Rosenbluth. Computer search for layer materials that maximize the reflectivity of X-ray multilayers. *Revue de Physique Appliquee*, 1988, **23**: 1599~ 1621
- 7 C. Montcalm, P. A. Kearney, J. M. Slaughter. 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
- 8 P. A. Kearney, J. M. Slaughter, C. M. Falco. Materials for multilayer X-ray optics at wavelengths below 100Å. *Opt. Eng.*, 1991, **30**(8): 1076~ 1080
- 9 Shi Xu, B. L. Evans. Normal incidence multilayer mirrors for the wavelength range 2.3 to 4.46 nm. *J. Modern Optics*, 1991, **38**(8): 1631~ 1654
- 10 Shao Jianda, Yi Kui, Fan Zhengxiu *et al.*. Deposition and absolute reflectivity measurements of a Mo/Si multilayer for 13.1 nm soft X-ray at 45° incidence angle. *Chinese J. Lasers* (中国激光), 1998, **A25**(6): 565~ 569 (in Chinese)

Theoretic Design of Multilayers for Soft X-rays (1~ 30 nm)

Shao Jianda Yi Kui Fan Zhengxiu Wang Runwen

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800)

Abstract A theoretic design and results of the soft X-ray multilayers are reported for the whole soft X-ray wavelength region. The optimal multilayers and their structures are predicted for different wavelengths.

Key words soft X-ray multilayer, reflectivity, theoretic design of the soft X-ray multilayers