

# 软 X 射线多层膜成像系统带宽匹配条件研究<sup>\*</sup>

王占山 曹健林

(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** 从多层膜反射软 X 射线的特性出发, 分析了两块多层膜组成系统的光强传输效率和位相变化关系, 给出了成像系统带宽匹配条件。

**关键词** 软 X 射线 多层膜 成像系统 带宽匹配

## 1 引言

近十几年来, 软 X 射线多层膜技术取得了长足的发展。到目前为止, 人们已可以在 11 ~ 14nm 波段获得大于 60% 的反射率<sup>[1,2]</sup>。在其它波段, 多层膜正入射的反射率也达百分之几到百分之几十, 这样的反射率使多层膜从单纯的实验研究步入到实用化阶段, 从而把多块反射镜组成的高像质成像系统从红外、可见和紫外波段拓展到软 X 射线波段。这种系统已逐步在天文学、X 射线激光及同步辐射研究领域得到应用, 并在显微术和投影光刻技术研究中显示出广阔的应用前景。

软 X 射线多层膜虽可极大地提高软 X 射线的正入射反射率, 但和其它波段相比, 反射率还是较低的。因此, 在设计软 X 射线成像系统时, 为了提高成像系统对光的传输效率, 通常是尽可能减少多层膜反射镜的面数。若要求一个系统可校像差, 最少使用的镜面数是 2。鉴于此, 目前国际上发展起的各种软 X 射线系统如望远镜<sup>[3]</sup>, 显微镜<sup>[4]</sup>, 投影缩小系统<sup>[5,6]</sup>大都采用两块球面或非球面反射镜。由于多层膜反射软 X 射线具有极强的光谱选择性, 所以在研制软 X 射线多层膜成像系统时, 必须考虑多层膜的这种特性。

本文我们从多层膜反射软 X 射线的特性出发, 研究两块多层膜反射成像系统光的传输特性和相位特性, 得出两块多层膜之间的带宽匹配条件。

\* 本项目得到国家自然科学基金和吉林省科委青年基金资助

收稿日期: 1997- 07- 15

修稿日期: 1997- 10- 25

## 2 多层膜反射特性

多层膜反射遵循 Bragg 定律

$$m\lambda = 2d\cos\theta \quad (1)$$

式中  $m$  是衍射级次,  $\theta$  是入射角,  $d$  是多层膜周期,  $\lambda$  是入射软 X 射线波长。由 (1) 式可以看出多层膜反射的光谱与入射角  $\theta$  和多层膜周期有直接关系。图 1(a)、(b) 是模拟计算出的峰值反射波长为 18.2nm 的多层膜反射率与波长和入射角的变化关系。从图中可以看出, 多层膜的带宽为 1nm。这样窄的带宽表明, 要使用两块多层膜反射镜组成系统时, 必须考虑两块多层膜间的带宽匹配问题。

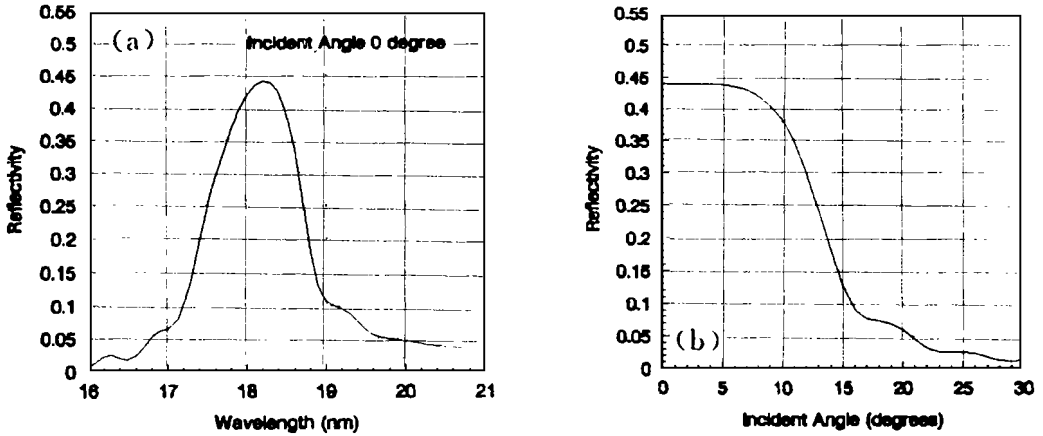


Fig. 1 The calculated soft X-ray reflectivities of a Mo/Si multilayer at wavelengths around 18.2nm at normal incidence (a) and at around normal incidence at 18.2nm (b)

## 3 两块反射镜系统多层膜间带宽匹配问题分析

设两反射镜系统中两块多层膜的光谱反射率分别为  $R_1(\lambda)$  和  $R_2(\lambda)$ , 则整个系统的通光效率

$$T = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} R_1(\lambda) \cdot R_2(\lambda) d\lambda \quad (2)$$

实际多层膜峰值反射波长相对设计值的改变是由于制备时多层膜周期的偏差造成的。根据两反射镜系统中两块多层膜周期与其设计值偏差量的大小分别计算出  $R_1(\lambda)$  和  $R_2(\lambda)$ , 再由 (2) 确定出系统的通光效率  $T$ , 最后把峰值反射波长有偏差的多层膜组成系统的通光效率按峰值反射波长没有偏差的多层膜组成系统的通光效率进行归一化, 得出系统的相对通光效率。经分析我们认为两块多层膜实际峰值反射波长差与中心波长的比可较好地反应出两块多层膜带宽匹配的情况, 因此, 我们让系统中一块多层膜峰值反射波长变短, 另一块变长, 也就是让一块多层膜的周期与设计值相比偏小, 另一块与设计值相比偏大。

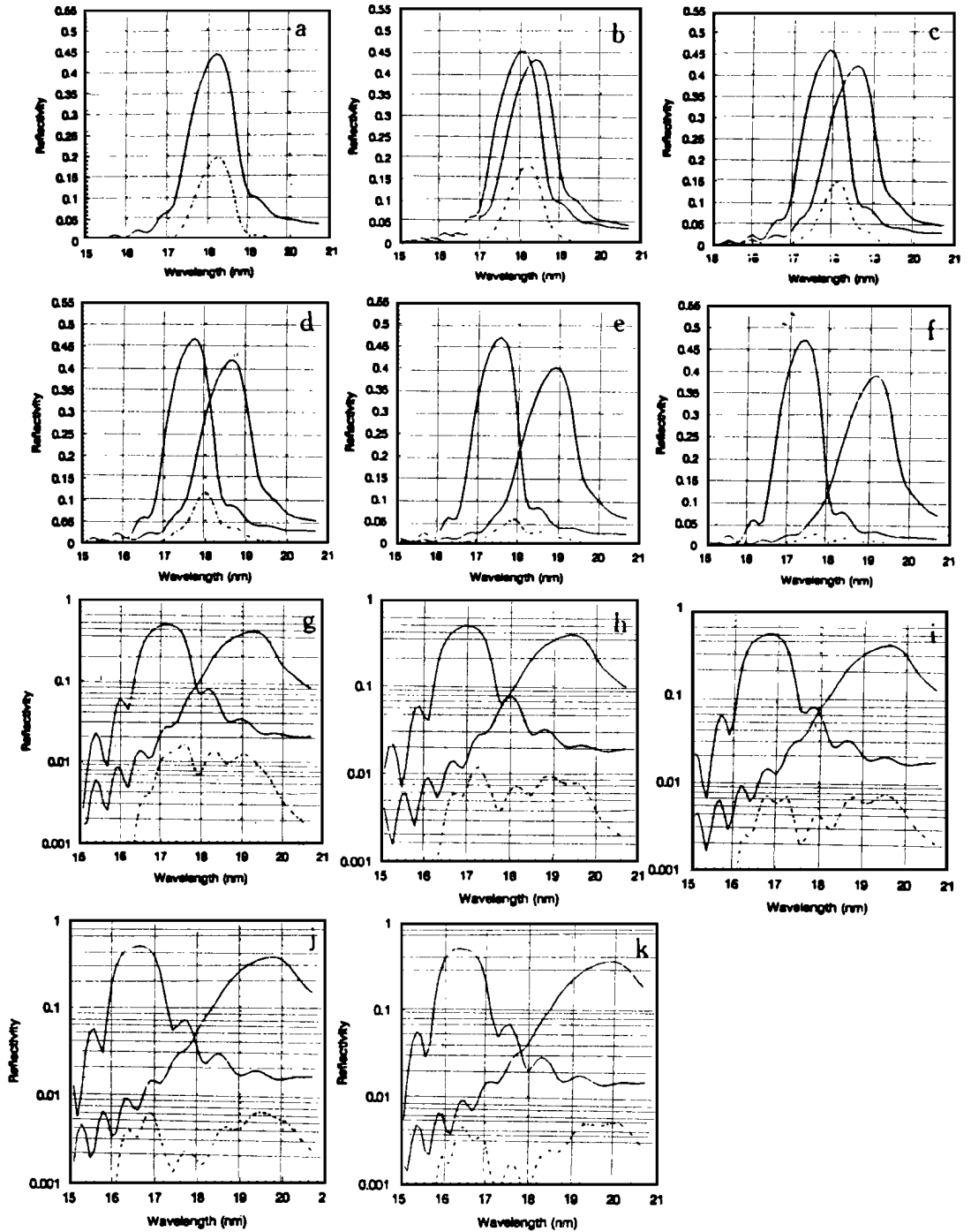


Fig. 2 The throughput change with the difference of peak reflective wavelengths of two multilayers

图 2(a) 为两块多层膜峰值反射波长完全重合时,  $R_1(\lambda)$ ,  $R_2(\lambda)$  和  $R_1(\lambda)R_2(\lambda)$  与波长的变化关系, 图 2(b) 为第一块镜子周期偏小 1%, 第二块镜子周期偏大 1% 时,  $R_1(\lambda)$ ,  $R_2(\lambda)$  和  $R_1(\lambda)R_2(\lambda)$  与波长的变化关系, 图 2(c)、(d)、(e)、(f)、(g)、(h)、(i)、(j) 和 (k) 分别为第一块镜子周期偏小 2%、3%、4%、5%、6%、7%、8%、9% 和 10%, 第二块镜子周期偏大 2%、3%、4%、5%、6%、7%、8%、9% 和 10% 时,  $R_1(\lambda)$ ,  $R_2(\lambda)$  和  $R_1(\lambda)R_2(\lambda)$  与波长的变化关系, 分别对图 2 中的  $R_1(\lambda)R_2(\lambda)$  曲线积分, 并进行归一化, 所得结果如图 3 所示。横轴为两块多层膜峰值反射波长差与其中中心值(设计值)的比, 纵轴为系统的相对通光效率。由图可知对于工作波长为 18.2nm 的系统, 两块多层膜峰值反射波长差与其中中心波长的比为 3.3% 时, 整个系统通光效率为两块多层膜峰值反射波长完全重合时的 56%, 这个 3.3% 的比值相当于两块多层膜峰值反射波长之差等于多层膜反射带宽的二分之一, 可以认为这时系统的多层膜刚刚满足系统通光效率的要求, 若要得到更大的通光效率, 两块多层膜峰值反射波长差应更小, 也就是两块多层膜峰值反射波长之差比多层膜带宽的二分之一还小, 如为四分之一, 八分之一等, 这个值由系统对通光效率的需要决定。

上面讨论的只是多层膜反射率对系统通光效率的影响, 而没有考虑多层膜反射过程中反射光相位的变化。图 4(a) - (k) (见下页) 分别为两块多层膜周期从 0 到 10% 变化过程中, 每变化 1% 时两块多层膜的相位变化情况, 图 5 为根据图 4 作出的系统出射光在多层膜有周期变化时, 相位变化曲线。由图可知, 在两块多层膜反射镜峰值反射波长之差与其中中心波长的比从 0 变到 5% 过程中, 相位差变化接近线性, 最大为  $0.7\pi$ 。要使系统成像尽可能接近衍射极限, 经系统后, 光的相位变化要尽量小, 与上面多层膜带宽二分之一带宽确定的范围一致, 反射光相位变化小于  $\pi/2$ , 这对一般成像是足够的, 若要系统完全达到衍射极限成像, 反射光的相位变化要小于  $\pi/4$ , 这时要求两块多层膜峰值反射波长之差小于带宽的四分之一, 这是极为严格的。

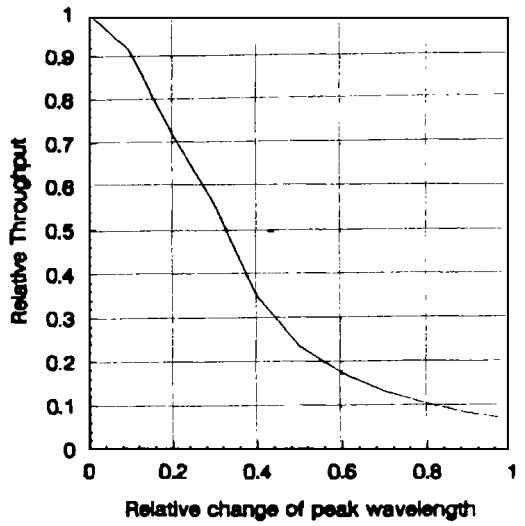


Fig. 3 The relative throughput of a two-multilayer imaging system along the ratio of the difference of peak reflective wavelengths of two multilayers and center wavelength

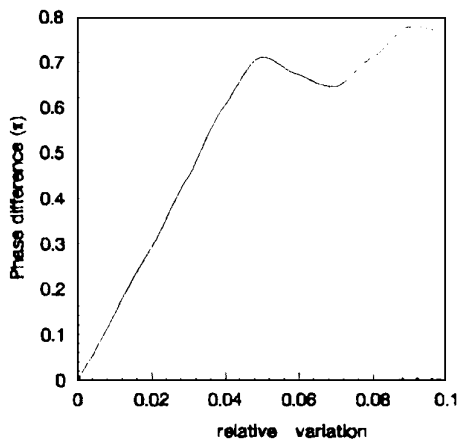


Fig. 5 The phase changes of a two-multilayer imaging system along the ratio of the difference of peak reflective wavelengths of two multilayers and center wavelength

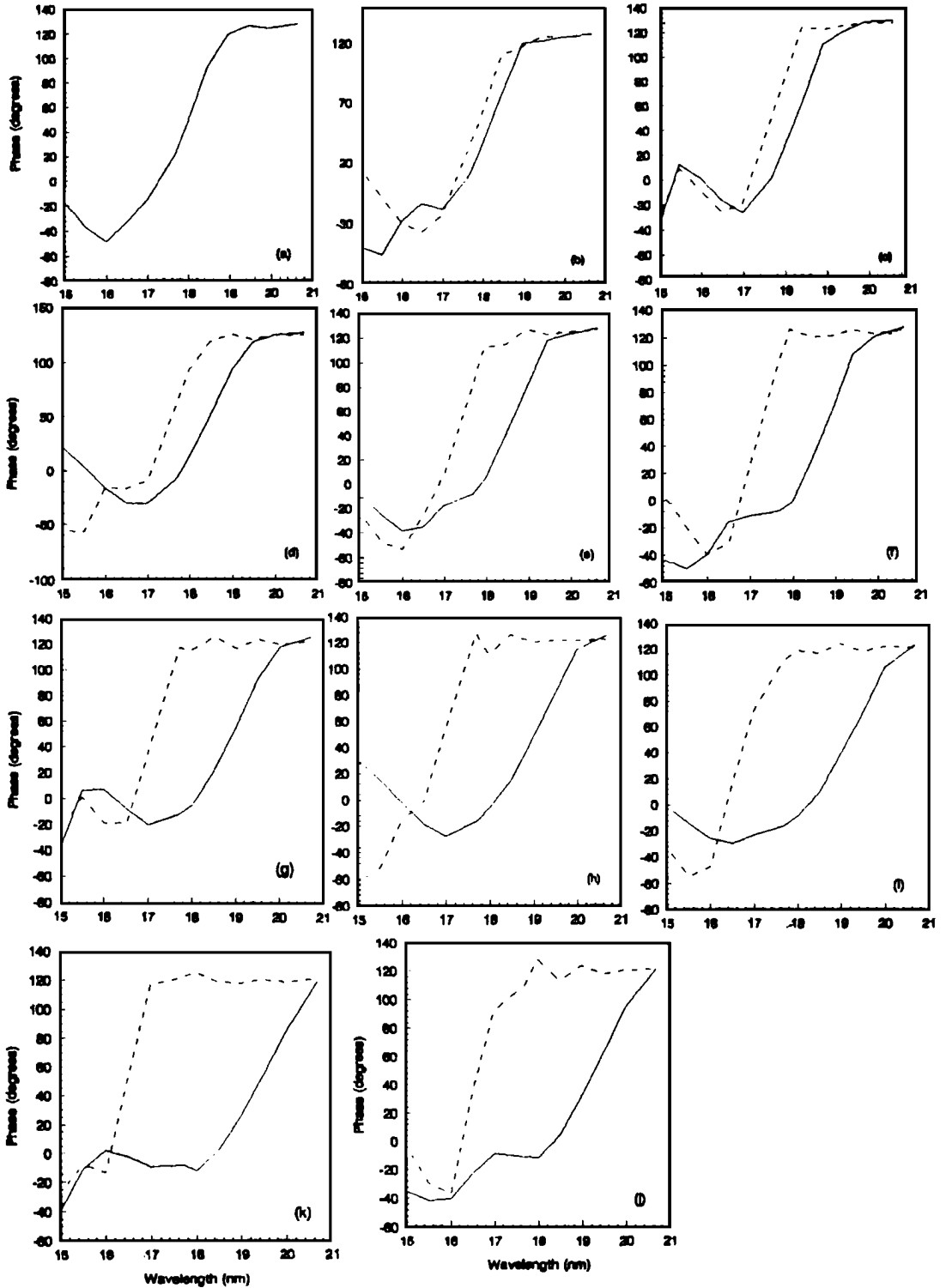


Fig.4 The phase change with the difference of peak reflective wavelengths of two multilayers

## 4 结 论

通过工作波长为 18.2nm 的两反射镜系统的通光效率和出射光相位差分析, 我们得到要使系统完全达到衍射成像, 两块反射镜的峰值反射波长之差必须小于多层膜带宽的四分之一, 对一般成像, 也要控制在二分之一以内。

随着工作波长的缩短, 多层膜的带宽变得越来越小。从上面分析可知, 系统工作波长越短, 两块多层膜间的带宽匹配要求更为严格, 实现起来更为困难。

### 参 考 文 献

- 1 Stearns D J, Rosen R S, Vernon S P. Multilayer mirror technology for soft x-ray projection lithography. *Appl Opt*, 1993, 32: 6952 ~ 6960
- 2 Zernike F, Atwood D T. Ed OSA Proc Extreme Ultraviolet Lithography, 1994, 23: 52
- 3 Walker A B C et al. Soft x-ray images of the solar corona with a normal incidence cassegrain multilayer telescope. *Science*, 1988, 241: 1781 ~ 1787
- 4 Iketaki Y et al. Evaluation of the optical characteristics of the schwarzchild x-ray objective. *Opt Lett*, 1994, 19: 1804 ~ 1806
- 5 Haga T, Tinone M C K, Takenaka H, Kinoshita H. Large field replication by EUV lithography, *Micro-electronic Engineering*, 1996, 30: 170 ~ 175
- 6 Tichenor D A, Kubiak G D, Stulen R H. Extreme Ultraviolet Lithography for Circuit Fabrication at 0.1  $\mu\text{m}$  feature size. *Proc SPIE*, 1995, 2523: 23 ~ 28

## The Wavelength Matching Conditions for Soft X-ray Imaging Optics Included Two Multilayer Mirrors

WANG Zhan-Shan, CAO Jian-Lin

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

### Abstract

We analyse the throughput and phase change for soft X-ray imaging optics included two multilayer mirrors with the spectral and phase performance of multilayer mirrors. The waveband matching conditions are obtained within above analysis.

**Key words:** Soft x-ray multilayer, Imaging system, Waveband matching conditions

王占山 男, 副研究员, 1985 年毕业于天津南开大学物理系, 1988 年在中科院长春光学精密机械研究所获硕士学位, 1996 年在中科院上海光学精密机械研究所获博士学位。从参加科研工作以来, 主要从事短波光学术研究。