

软 X 射线光学系统曲面镀膜膜厚测量方法

刘毅楠, 马月英, 裴 舒, 胡卫兵, 曹健林

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所应用光学国家重点实验室, 吉林 长春 130022)

摘要: 软 X 射线光学系统需要在超光滑曲面上均匀镀膜。我们将超光滑曲面看作由若干个小平面拼接而成, 通过小角衍射仪测量出各个小平面的周期膜厚, 并拟和出整个曲面的镀膜速率。为提高控制精度, 我们对同一片多层膜进行等精度多次测量, 去除其中的粗大误差、系统误差, 最后得到多层膜厚度的最佳估计值。

关键词: 软 X 射线多层膜; 曲面基片; 误差分析

中图分类号: O484.5 **文献标识码:** A

1 引 言

近年来, 随着软 X 射线多层膜技术的深入发展^[1-3], 人们已可以在 11 ~ 14nm 波段获得大于 60% 的反射率^[1], 在其他波段, 多层膜正入反射率也达到百分之几到百分之几十, 这样高的反射率使多块反射镜组成高质量的软 X 射线成像系统成为现实。这种系统已逐步在软 X 射线天文望远镜、显微镜、投影光刻机、同步辐射光束线等仪器和装置中成功地获得了应用。与传统的由掠入射元件及波带片组成的系统相比, 软 X 射线多层膜构成的反射光学系统具有分辨率和光通量高, 热辐射性能好, 结构简单等突出优点。

在制作软 X 射线反射光学系统时, 需要在大面积曲面上镀制均匀或非均匀的多层膜, 这使多层膜的制作技术面对极为严峻的挑战。以软 X 射线投影光刻(SXPL)为例, 为了获得足够的光通量, 多层膜的反射率必须超过 60%; 由于多层膜的反射带宽小于 1nm, 要求各反射镜带宽匹配良好^[4]; 为了达到接近衍射极限分辨率, 由多层膜带来的反射镜面形误差应小于 $\lambda/16$, 即波前差为 $\lambda/8$, λ 为软 X 射线波长。

多层膜带来的面形误差源于如下几个方

面^[1]:

(1) 多层膜周期厚度不同带来面形误差, 这种误差既包括面形的实际改变, 也包括由于多层膜周期变化带来的反射光相位变化;

(2) 软 X 射线在基片各点入射角不同导致反射光相位变化带来波前差, 这是干涉反射膜的基本特性, 对于大视场成像, 只能通过减小数值孔径予以消除;

(3) 多层膜有残余应力。由于以上三项因素, 必须考虑到多层膜对 SXPL 成像系统分辨率的影响, 减小这些影响的有效而简单的方法就是采用小数值孔径成像系统。当数值孔径小于 0.1 时, 可在成像系统上均匀镀膜以实现接近衍射极限的分辨率, 而且还满足系统对焦深的要求^[5]。尽管如此, 成像系统对膜厚均匀性的要求也是极为苛刻的, 为使波前差小于 $\lambda/8$, 对于峰值波长为 13nm、周期厚度为 6.9nm、40 对的多层膜, 膜层周期均匀性应小于 $\pm 0.02\text{nm}$ ^[1]。

目前, 曲面镀膜的膜厚控制包括加挡板及不加挡板两种方法^[5,6]。无论采用哪种方法, 都要准确测量出曲面上各点的镀膜速率, 并严格控制测量精度。本文将重点讨论软 X 射线曲面膜厚分布测量方法及精度分析。

2 软 X 射线曲面镀膜厚度测量方法

曲面镀膜定标方法的基本原理, 是将超光滑曲面看作由小面积平面超光滑硅片拼接而成。在正式的超光滑曲面上镀膜之前, 先在一个面形相同而粗糙度没有要求的曲面上做膜厚周期分布测量实验。

选取一块凹面镜, 直径为 60mm, 曲率半径为 1000mm, 用如下方式在曲面上选择测量点。首先, 用软尺过曲面中心贴在凹面镜上, 每隔 5mm 做一个标记并磨出一个凹痕, 使硅片恰好能够放进去, 即各硅片中心之间的弧长距离 Γ 为 5mm。加工一批尺寸均为 6mm × 3mm 的超光滑硅片, 将硅片放入凹痕并使硅片表面与曲面相切^[7]。将曲面固定在绕中心转动的圆盘上, 转轴与曲面中心重合, 通过旋转提高镀膜均匀性。

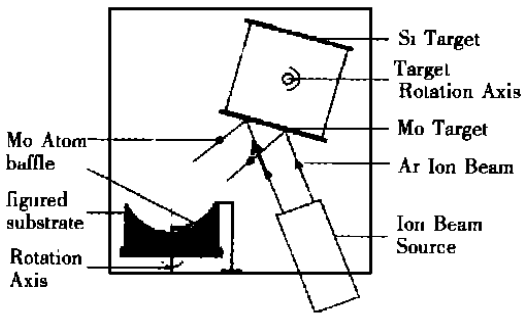


Fig. 1 Ion beam sputtering system for ML deposition

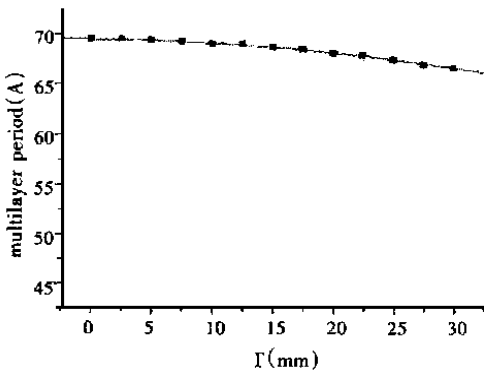


Fig. 2 Measured ML period on the figured substrate

采用离子束溅射镀膜的方法在曲面上镀制 Mo/Si 多层膜, 离子源、靶材、挡板及基片位置如图 1 所示, 制备时采用如下工作参数: 离子源到 Mo 及 Si 靶间距为 150mm, 本底真空度为 6.7×10^{-4} Pa。镀膜时射频功率 280W, 束流电压为 500V, 束流电流 100mA, 加速电压 250V, 中和器电流 120mA, Ar 气流量 $4\text{cm}^3/\text{min}$ 。Si 靶的射频功率为 328W, 束流电压 800V, 束流电流 100mA, 加速电压 300V, 中和器电流 120mA, Ar 气流量 $4\text{cm}^3/\text{min}$ 。这样选择工作参数后, 得到的镀膜速率为 $V_{\text{Mo}} = 0.12\text{nm}/\text{s}$, $V_{\text{Si}} = 0.07\text{nm}/\text{s}$ 。

采用上述工作参数镀膜后, 曲面上每块硅片上的多层膜都用一台日本理学公司的 D/Max-3B 型 X 射线衍射仪做周期结构测试。测试时用 $\text{CuK}\alpha$ 线, 波长为 0.154nm。根据衍射峰值位置, 采用修正的 Bragg 公式计算得出多层膜的周期厚度

$$m\lambda = 2d[\sin\Theta - (1 - n)/\sin\Theta] \quad (1)$$

式中 m 为衍射级次, d 为周期厚度, Θ 为相应的衍射角, n 为一个周期内折射率的平均值。测出与每个 m 对应的 Θ 后, 对上式做曲线拟合即可相当精确地定出 d 。

图 2 给出周期 d 随弧长 r (参照图 1) 变化的测量结果, 受靶材、基片间距及入射角影响, 中心区域多层膜周期厚度明显高于边缘区域。

此方法不仅用来测量曲面上各点的镀膜速率, 还可以用来检验挡板面形的准确性。

3 精度分析

任何测量都必然存在误差, 以小角衍射仪测量多层膜周期时也是如此。由于 SXPL 成像系统对膜厚均匀性的要求极为苛刻, 应小于 $\pm 0.02\text{nm}$, 因此必须严格控制测量精度, 否则就不能满足分辨率及光通量的要求。

我们对每块多层膜都采用等精度测量方法多次测量, 用(1)式计算每次测量的周期厚度, 得到每一块多层膜周期厚度的一组数据。以曲面旋转中心的多层膜为例, 每次测量时都旋转 36° 重新装片, 结果如表 1 所示。

Table 1 Multi-measured periods of one sample

| | period(nm) | remaining error |
|---------|--------------|-----------------|
| 1 | 6. 8002 2 | - 0. 028 1 |
| 2 | 6. 8276 5 | 0. 246 2 |
| 3 | 6. 7657 8 | - 0. 372 5 |
| 4 | 6. 8048 8 | 0. 018 5 |
| 5 | 6. 8309 9 | 0. 279 6 |
| 6 | 6. 7873 7 | - 0. 156 6 |
| 7 | 6. 8030 9 | 0. 000 6 |
| 8 | 6. 8022 6 | - 0. 007 7 |
| 9 | 6. 7878 9 | - 0. 151 4 |
| 10 | 6. 8201 4 | 0. 171 1 |
| Average | 6. 8030 3 | |

对表 1 数据我们采用残余误差校核法及格罗布斯判别准则,判断出该测量列无系统误差及粗大误差存在^[8]。

根据贝塞尔公式求得该测量列单次测量的标准差 σ 为

$$\sigma_x = \frac{\sqrt{\frac{1}{10} \sum V_i^2}}{10 - 1} = 0. 1987$$

参考文献:

- [1] Sterns D G, Rosen R S, Veron S. Multilayer mirror technology for soft X-ray projection lithography[J]. Appl. Opt, 1993,32(34):6952- 6960.
- [2] Spiller E, Golub L. Fabrication and testing of large area multilayer coated X-ray optics[J]. Appl. Opt, 1989, 28 (14): 2969- 2974.
- [3] Sterns D G, Rosen R S, Veron S P. Fabrication of high-reflection Mo-Si multilayer mirrors by planar-magnetron sputtering[J]. J. Vac. Sci. Technol, 1991, A9(5):2661- 2669.
- [4] Gains D P, Sommargren G E, Veron S P, English R E. X-ray characterization of a Three-Element condenser system for SXPL[C]. OSA Proceedings on Soft X-ray Projection Lithography, 1993,18:66- 69.
- [5] Kinoshita H, Kurihara K, Ishii Y, Orii Y. Soft X-ray reduction Lithography using multilayer mirror[J]. J. Vac. Sci. Technol, 1989, B7(6):1648- 1651.
- [6] Windt D L, Waskiewicz W K. Multilayer Facilities for EU V lithography[C]. OSA Proceedings on Soft X-ray Projection Lithography, 1994,23:47- 51.
- [7] Gains D P, Veron S P, Sommargren G E, Kania D R. Coating Strategy for Enhancing Illumination Uniformity in a Lithography Condenser[C]. OSA Proceedings on Soft X-ray Projection Lithography, 1994, 23:41- 46.
- [8] 费也泰. 误差理论与数据处理[M]. 北京:机械工业出版社,1995.

算术平均值的标准差 $\sigma_{\bar{x}}$ 为

$$\sigma_{\bar{x}} = \frac{\sigma}{10} = 0. 0628$$

采用 t 分布计算算术平均值的极限误差

$$t_{\alpha} = 2. 26$$

算术平均值的极限误差 $\delta_{Lim\bar{x}}$ 为

$$\begin{aligned} \delta_{Lim\bar{x}} &= \pm t_{\alpha}\sigma_{\bar{x}} = \pm 2. 26 \times 0. 0628 \\ &= \pm 0. 01420nm \end{aligned}$$

最后的测量结果为

$$d = \bar{d} \pm \delta_{Lim\bar{x}} = 68. 0303 \pm 0. 01420nm$$

显然,这种测量方法满足 $\pm 0. 02nm$ 的精度要求。

5 结 论

无论是软 X 射线投影光刻系统、软 X 射线显微成像系统还是软 X 射线望远系统,均要求在超光滑曲面上镀制多层膜。为实现各系统的设计性能,必须精确地控制曲面上各点的多层膜周期厚度,同时,还要将误差控制在允许的范围内。本文针对曲面均匀镀膜的要求,讨论了膜厚测量及精度控制方法,为今后的软 X 射线光学系统的设计及加工做了必要的技术准备。

Period measuring and accuracy analyzing method for soft X-ray optical system

LIU Yi-nan, MA Yue-ying, PEI Shu, HU Wei-bing, CAO Jian-lin

*(The State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics,
Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130021, China)*

Abstract: Recent advances in multilayer mirror technology meet many of the stringent demands of soft X-ray projection lithography (SXPL). The maximum normal-incident reflectivity achieved to data, is 66% for Mo/Si multilayers at 13.4 nm, which is sufficient to satisfy the X-ray throughput requirements of SXPL. These high-performance coatings must be deposited on figured optics with layer-thickness error controlled in $\sim 0.5\%$. Uniform multilayer coatings are required for SXPL imaging optics, so maintaining the surface figure is critical to achieve diffraction-limited performance. In this paper, the figured substrate is considered as small super polished planes on the figured curve. By measuring the periods of multilayer on every small plane with small angle diffraction, the deposition speed of the figured substrate can be obtained. For improving the accuracy, every multilayer is measured repeatedly to wipe off the crude and systematic errors, acquire the best value, and calculate limiting error.

Key words: soft X-ray multilayer; figured substrate; error

作者简介: 刘毅楠(1969-), 男, 吉林省长春市人。1991年毕业于长春光机学院光学仪器专业, 1994年考入中国科学院长春光机所, 在应用光学国家重点实验室从事生物样品软 X 射线接触式显微术研究工作, 1997年4月攻读光学博士学位。