

文章编号: 1001-4322(2003)05-0444-03

均匀软 X 射线多层膜制备方法研究*

金春水, 林 强, 马月英, 裴 舒, 曹健林

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130022)

摘 要: 介绍了基于速度调制技术的均匀软 X 射线多层膜制备方法, 并采用该方法在直径为 150mm 的平面硅基板上制备出 Mo/Si 多层膜, 其中心波长为 13.5nm, 膜厚空间非均匀性优于 1%, 较转盘匀速溅射方法制备的多层膜膜厚空间均匀性提高了近 6 倍。

关键词: 软 X 射线; 多层膜; 磁控溅射; 均匀性

中图分类号: O434.14

文献标识码: A

随着光学超精密加工与检测技术、超薄膜制备技术和微制造技术的发展, 近二十年来, 软 X 射线光学取得了飞速发展, 尤其是软 X 射线多层膜技术, 它是软 X 射线光学中最重要的关键技术之一。它的发展促进了软 X 射线光学在 X 射线天文观测^[1]、显微术^[2]、极紫外投影光刻技术^[3]、X 射线激光研究^[4]及 ICF(惯性约束核聚变)^[5]等领域的应用。

在软 X 射线波段(1~30nm), 任何材料的折射率均接近 1, 而且吸收大, 无法组成透射式光学系统; 同时, 单界面正入射反射率几乎为零, 正入射软 X 射线成像光学系统只能由镀有软 X 射线多层膜的反射镜构成。该系统为了达到近衍射极限的分辨率, 要求其系统波像差为工作波长的若干分之一。在系统波像差的构成中, 除光学系统的设计残差、光学系统装调误差和多层膜反射镜原始面形加工误差外, 软 X 射线多层膜的非均匀性是构成系统波像差的重要组成部分。

目前, 普遍使用挡板补偿技术控制多层膜的均匀性。它是将特殊制作的补偿板置于被镀元件与镀膜材料之间, 以补偿多层膜周期厚度的空间不均匀性。美国的劳伦斯·利弗莫尔实验室和 AT&T 贝尔实验室的研究人员采用此项技术制备了用于极紫外投影光刻系统、中心波长为 13.5nm 的 Mo/Si 多层膜, 其周期厚度均匀性为 $\pm 0.05\text{nm}$ ^[6], 但是需根据光学元件制作特定的补偿板, 缺少通用性, 工艺复杂。本文介绍了基于速度调制技术的均匀软 X 射线多层膜制备方法^[7], 并在 $\phi 150\text{mm}$ 的硅片上完成了大口径均匀软 X 射线多层膜的制备。检测结果表面: 对于峰值波长为 13.5nm、周期厚度为 6.95nm 的 Mo/Si 多层膜, 膜厚空间分布非均匀性优于 1% (P-V)。

1 软 X 射线成像光学系统对多层膜均匀性的要求

在软 X 射线成像光学系统中, 多层膜引入的系统波像差产生于两种反射波面相移: 一种是通光口径内多层膜膜厚空间分布非均匀性引入反射镜面形误差导致的反射波面相移; 另一种产生于多层膜对软 X 射线的反射。多层膜反射镜通光口径内多层膜周期厚度非均匀性引起的相位变化可表示为

$$\phi = 4 \pi N \Delta d / \lambda \quad (1)$$

式中: ϕ 为相位变化, N 为镀制的多层膜对数, Δd 为通光口径内的多层膜周期厚度变化, λ 为系统工作波长。软 X 射线多层膜反射镜通常需镀制几十对甚至上百对多层膜, 而且系统通常由多块多层膜反射镜组成, 这就对多层膜膜厚空间分布均匀性提出了极为苛刻的要求。

多层膜反射镜引入的第二种反射相位变化源自于软 X 射线入射角变化及多层膜周期厚度空间不均匀性的共同影响。在近正入射角范围内, 由入射角变化引起的相位变化远小于第一种相位变化。例如, 在通常限定的 $\pm 6^\circ$ 入射角范围内, 其引起的波像差为 $\lambda/20$, 可忽略^[8]。最终可将减小多层膜引入的光学系统波面误差归结到提高其周期厚度空间均匀性上。

在软 X 射线成像系统中, 为了使多层膜膜厚空间分布非均匀性引入的波面误差小于 $\lambda/4$, 对于工作波长为

* 收稿日期: 2002-06-26; 修订日期: 2003-01-15

基金项目: 国家自然科学基金重点资助课题(69938020); 中国科学院创新基金资助课题

作者简介: 金春水(1964), 男, 博士, 研究员, 从事极紫外及软 X 射线光学研究。

13.5nm、周期厚度为 6.95nm 的 40 对多层膜,膜系周期厚度非均匀性应小于 0.1nm。采用通常的工艺方法很难在大口径光学基底上制备出膜厚空间均匀性如此高的均匀多层膜,必须采用特殊的制备技术。

2 磁控溅射镀膜装置与多层膜制备工艺

图 1 为用于制备均匀软 X 射线多层膜的磁控溅射镀膜装置结构示意图,由两组 20cm × 10cm 的矩形磁控源、直流和射频溅射电源、转盘/被镀件自转机构、被镀件加热和离子束清洗系统、隔板及相应的真空室和真空获得系统组成。两组矩形磁控源和两组被镀件自转系统分别相隔 180° 和 90° 布置,以使磁控溅射镀膜装置可同时在两个被镀件上镀制相同或不同周期结构的多层膜。转盘的公转速度为 0.000 8 ~ 2.5r/min,被镀件的自转速度为 10 ~ 300 r/min。磁控溅射镀膜装置的直流和射频溅射电源最高额定功率均为 2kW,本底真空度为 2×10^{-4} Pa。

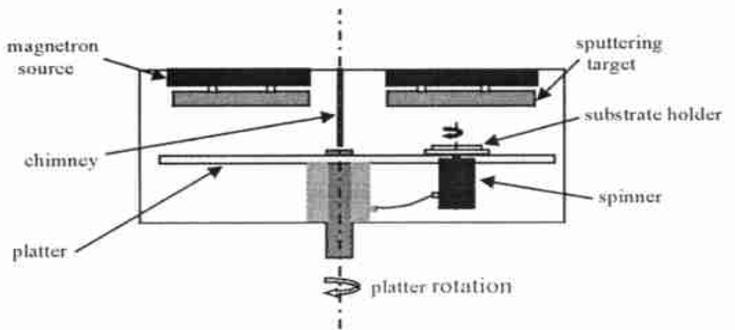


Fig 1 Layout of the DC magnetron sputter system used to deposit multilayer coatings

图 1 磁控溅射镀膜装置结构示意图

磁控溅射镀膜过程中,通过控制转盘的回转带动被镀件公转扫过镀膜材料,实现两种镀膜材料的交替溅射镀膜。在溅射功率及工作气体压强一定的条件下,被镀件任一点的膜层厚度取决于其公转速度和相对于公转中心的距离。若在被镀件公转的同时,附以高速自转,则可获得相对于被镀件自转中心圆对称分布的多层膜,为进一步利用速度调整技术修正膜厚空间变化创造条件。

利用速度调整技术控制膜厚空间分布是通过改变被镀件不同空间位置经过溅射靶材的公转速度,控制其在溅射镀膜区的停留时间,获得均匀或梯形多层膜,速度调整曲线是被镀件相对于磁控源位置的函数。例如,如果被镀件以恒定的公转速度扫过磁控源时,在被镀件上镀制的多层膜厚度空间分布为边缘薄、中心厚,则可通过减小被镀件边缘进入和离开溅射区域的转速,获得更为均匀的多层膜。

3 大口径均匀软 X 射线多层膜的制备与检测

利用上述磁控溅射镀膜装置和均匀软 X 射线多层膜制备工艺,在 $\phi 150\text{mm}$ 的硅片上进行了 Mo/Si 软 X 射线多层膜的制备实验。当被镀件以恒定的公转速度扫过磁控溅射源时,在 $\phi 150\text{mm}$ 硅片上的多层膜周期厚度变化约为 7% (P-V),边缘的厚度远薄于中间的厚度,如图 2 中的虚线。进而,采用速度调制技术,使被镀件边缘进入和离开溅射区时的公转速度比在溅射区中间的公转速度慢,调整多层膜厚度的空间分布,在 $\phi 150\text{mm}$ 硅片上获得了周期膜厚空间非均匀性优于 1% (P-V,约 0.07nm) 的均匀软 X 射线多层膜,如图 2 中的实线所示。图 3 为均匀软 X 射线多层膜样品的照片。

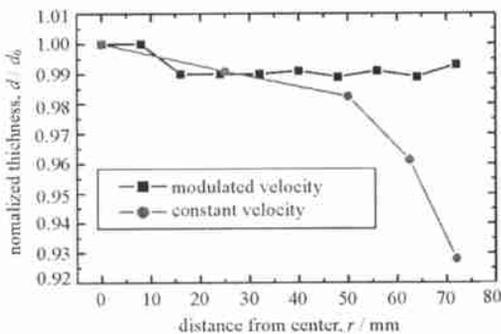


Fig. 2 Spatial uniformity of Mo/Si multilayers
图 2 Mo/Si 多层膜的半径方向的空间分布

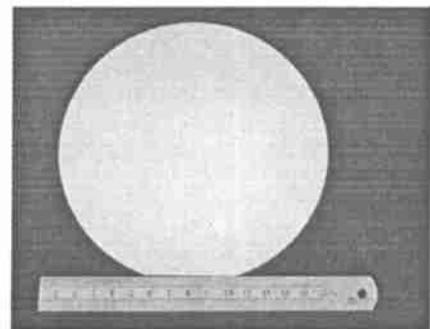


Fig. 3 $\phi 150\text{mm}$ Si wafer coated with uniform multilayer
图 3 $\phi 150\text{mm}$ 硅片上镀制的均匀 Mo/Si 多层膜样品

在进行多层膜周期厚度空间分布检测时,利用了工作波长为 0.154nm 的 X 射线衍射仪。它通过精确测定多层膜样品沿直径方向各点不同级次衍射峰的位置,然后利用校正的 Bragg 方程

$$\sin^2 m = (m / 2d)^2 + 2 \quad (2)$$

进行最小二乘法拟合来精确测定多层膜的周期厚度。式中, d 为多层膜周期厚度, m 为衍射峰级次, m 为与 m 次衍射峰对应的衍射角, n 为多层膜材料的折射率偏离 1 的平均值。

实验中采用的日本理学 DMAX-B 型 X 射线衍射仪的五次测量算术平均值最大偏差 (3%) 为 $0.013\text{nm}^{[9]}$, 就本文的多层膜周期厚度均匀性检测结果, 具有足够的检测精度。图 4 给出了均匀多层膜样品某一点 X 射线衍射仪检测的周期性衍射峰曲线, 从三级衍射峰开始进行了 60 倍放大, 锐利的衍射峰说明 Mo/Si 多层膜具有良好的周期结构。

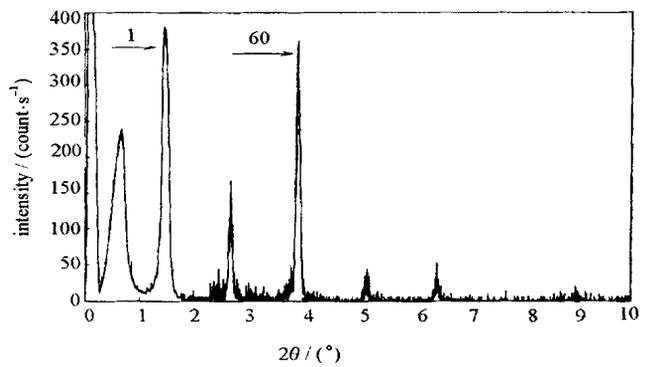


Fig. 4 X-ray diffraction profile of a Mo/Si multilayer

图 4 Mo/Si 多层膜样品的 X 射线衍射图

4 结论

利用基于速度调制技术的均匀软 X 射线多层膜制备方法, 在 $\phi 150\text{mm}$ 的硅片上制备出周期厚度均匀性优于 1% (P-V, 0.071nm)、中心波长为 13.5nm 的 Mo/Si 多层膜, 膜厚空间分布均匀性较匀速磁控溅射方法提高了近 6 倍, 解决了大口径均匀软 X 射线多层膜制备的难题, 满足了极紫外投影光刻等成像光学系统对多层膜均匀性的要求; 另外, 基于速度调制技术的多层膜膜厚空间分布控制方法亦可用于梯形软 X 射线多层膜制备。

参考文献:

- [1] Zukic M, Kin J, Wilson M, et al. Non-grazing high reflective narrowband multilayer X-ray coatings[A]. SPIE[C]. 1993, **2011**:322—33.
- [2] Attwood D. New opportunities at soft X-ray wavelengths[J]. *Physics Today*, 1992, **45** (8):24—31.
- [3] 金春水, 王占山, 曹健林. 软 X 射线投影光刻技术[J]. *强激光与粒子束*, 2000, **12**(5):559—564. (Jin C S, Wang Z S, Cao J L. Soft X-ray projection lithography technology. *High Power Laser and Particle Beams*, 2000, **12**(5): 559—564)
- [4] Carillon A, Chen H Z, Dhez P, et al. Saturated and Near-diffraction-limited operation of an XUV laser at 23.6nm [J]. *Phys Rev Lett*, 1992, **68** (19):2917—2920.
- [5] Benattar R, Godart J, Bridoux F, et al. A Schwarzschild microscope to study the preheat of laser heated targets[A]. SPIE[C]. 1986, **688**:171—175.
- [6] Windt D L, Waskiewicz W K. Multilayer facilities required for extreme-ultraviolet lithography[J]. *J Vac Sci Technol*, 1994, **B12** (6): 3826—3832.
- [7] Charles Gwyn, et al. A white paper of extreme ultraviolet lithography[R]. EUVLLC, Livermore California, 1999.
- [8] Stearns D G, Rosen R S, Vernon S P. Multilayer mirror technology for soft-X-ray projection lithography[J]. *Applied Optics*, 1993, **32**(34): 6952—6969.
- [9] Lin B. Study on thickness distribution uniformity control of soft X-ray multilayer mirrors[D]. Changchun:Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, 2002.

Study of uniform soft X-ray multilayers deposition technology

JIN Chun-shui, LIN Qiang, MA Yue-ying, PEI Shu, CAO Jiarlin

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, the Chinese Academy of Sciences, Changchun 130022, China)

Abstract: A uniform soft X-ray multilayers deposition technology is introduced in this paper, in which the platter revolution speed is varied as a function of its position relative to the sputtering source. Using this method, the relative thickness variation of the Mo/Si multilayers with central wavelength of 13.5nm was reduced from 7% to 1% peak-to-valley over 150mm diameter region on flat Si substrates.

Key words: Soft X-ray; Multilayer coatings; Magnetron sputter; Uniformity