

X 射线布拉格-菲涅耳光学元件的实验研究*

王占山 马月英 吕俊霞 高宏刚 刘毅楠 裴 舒 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)

徐向东 洪义麟 付绍军

(中国科技大学国家同步辐射实验室, 合肥 230026)

摘 要 用光学全息方法在涂有光刻胶的多层膜表面上形成布拉格-菲涅耳元件所需的波带片图形, 通过离子束刻蚀方法将波带片图形转写到多层膜上, 完成元件的制作, 给出布拉格-菲涅耳光学元件测量结果。测量结果表明上述方法适于制作布拉格-菲涅耳元件。

关键词 X 射线布拉格-菲涅耳光学元件, 多层膜, 波带片, 离子束刻蚀。

1 引 言

随着 X 射线光源特别是高亮度第三代同步辐射光源的出现和相关应用的推动, X 射线光学技术取得了飞速发展。基于掠入射全反射现象制成的掠入射反射镜得到了广泛的应用, 但掠入射又限制了其性能。微细加工技术的发展使得透射式衍射光学元件波带片的加工水平得到了极大的提高, 用其制成的显微镜分辨率已低于 $30 \text{ nm}^{[1]}$ 。用超薄膜制备技术制作的多层膜可在正入射条件下工作于软 X 射线波段^[2]。布拉格-菲涅耳光学元件是将晶体或多层膜的布拉格反射与衍射图形波带片的菲涅耳衍射有机地结合起来, 是最新发展的反射式 X 射线光学元件^[3]。与自支撑的透射式衍射元件相比, 布拉格-菲涅耳光学元件制备在块状晶体或有厚基板的多层膜上, 具有高的机械稳定性和热稳定性, 易于冷却, 这一特性对于高强度第三代同步辐射应用极其重要。和掠入射光学元件与多层膜相比, 布拉格-菲涅耳光学元件的孔径很小, 所以, 它在亮度高、光斑小、发散角小的第三代同步辐射光源上得到了广泛的应用, 主要为 X 射线显微镜^[4]、X 射线微探针^[5, 6]及同步辐射光束发射度的监控器^[7]等。与以晶体作基板的布拉格-菲涅耳光学元件相比, 以多层膜为基板的布拉格-菲涅耳光学元件的光谱选择性差, 聚焦后获得的光强度高。目前, 这种元件的设计^[8, 9]和制备技术^[10]取得了飞速的发展。

在软 X 射线多层膜制备^[11]和离子束刻蚀技术制备衍射光学元件的基础上^[12], 本文作者开展了 X 射线布拉格-菲涅耳光学元件的实验研究工作。

2 X 射线布拉格-菲涅耳光学元件的制备

X 射线布拉格-菲涅耳的光学元件整个制作过程如图 1 所示。

* 国家自然科学基金、863 激光领域青年基金和应用光学国家重点实验室基金资助项目。

收稿日期: 1998-01-04; 收到修改稿日期: 1998-04-27

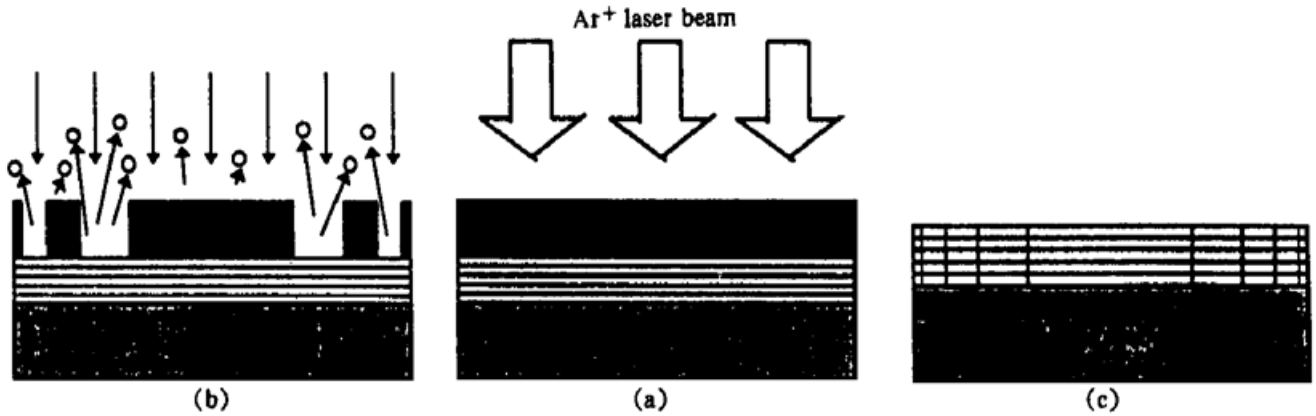


Fig. 1 Scheme of the Bragg-Fresnel optics fabrication. (a) Clear substrate, deposition of multilayer, preparation of photoresist, and UV exposure for mask production on the photoresist, (b) Ion beam etching of the multilayer, (c) Obtained Bragg-Fresnel optics structure

2.1 基板准备

制作 X 射线多层膜，必须采用表面粗糙度均方根值小于 1 nm 的基板。实验中基板是用 K9 玻璃经超精密加工而成，经 WYKO 表面轮廓仪测量得知，实验中采用的基板表面粗糙度均方根值小于 1 nm。在镀膜前，基板要经过严格清洗。

2.2 多层膜制备

多层膜是制备 X 射线布拉格-菲涅耳光学元件的基础。实验中用磁控溅射法制备 Mo/Si 多层膜。在制备多层膜时，膜厚的精确定标和控制精度极其关键。采用 Talystep 台阶仪和 X 射线衍射仪进行膜厚的精确定标。用时间控制法控制膜厚，要求在镀膜过程中有稳定的镀膜速率，也就是要有稳定的工作参数。经大量实验摸索，最后确定的镀膜速率为 $V_{\text{Mo}} = 0.12 \text{ nm/s}$ ， $V_{\text{Si}} = 0.07 \text{ nm/s}$ 。制备用于制作 X 射线布拉格-菲涅耳光学元件基板的多层膜周期为 7.6 nm。

2.3 全息曝光

在镀有多层膜的基板上，用旋涂法涂敷厚度约 300 nm 的 AZ1350 光刻胶。波带片全息图形是利用波长 $\lambda = 457.9 \text{ nm}$ 的氩离子激光经特殊设计的光学系统形成的，将基板放在激光干涉场中曝光，用 0.5% 的 NaOH 溶液显影，便得到光刻胶的浮雕波带片图形。

2.4 离子束刻蚀

离子束刻蚀是在离子束刻蚀机中进行的。以光刻胶上的波带片图形为掩模，用离子束把光刻胶的波带片图形刻到多层膜上。刻蚀后，用丙酮去掉光刻胶，得到 X 射线布拉格-菲涅耳光学元件。

3 实验结果

图 2 给出显微镜拍摄的制备好的 X 射线布拉格-菲涅耳光学元件的中心区域和边缘区域显微图。从图中可以看出制备的布拉格-菲涅耳光学元件的最细线宽小于 $1 \mu\text{m}$ ，并且元件完整，结构清晰。图 3 给出了用 Talystep 台阶仪测量的布拉格-菲涅耳光学元件的纵向深度的变化和离子束刻蚀后基板表面粗糙度的变化情况。图中横轴代表扫描长度，纵轴代表元件纵向深度变化，图 3(b) 是对图 3(a) 的虚线中部分进行了横轴方向的 10 倍放大。从图 3(a) 可看到布拉格-菲涅耳光学元件中心部分的全貌，从图 3(b) 可以看清布拉格-菲涅耳光学元件局部

的细节和刻蚀后元件表面粗糙度的变化。可以看出此布拉格-菲涅耳光学元件结构符合设计要求;基板经刻蚀后,表面粗糙度变化较小,不会引起多层膜效率的明显下降。图 4 是用 X 射线衍射仪测量的制备元件前后多层膜的结构信息,结果表明制备布拉格-菲涅耳光学元件后多层膜的结构依然完整,并且多层膜周期值保持不变,衍射峰值减小说明离子束刻蚀时将多层膜层数减小了。为了准确反应经上述方法制得的波带片多层膜的结构,将非波带片区的多层膜全部去掉,再用 X 射线衍射仪测量,结果如图 5 所示,它表明多层膜结构仍然很好。这些测量结果充分说明制备 X 射线布拉格-菲涅耳光学元件的过程不会破坏多层膜的结构和增加多层膜的表面粗糙度。

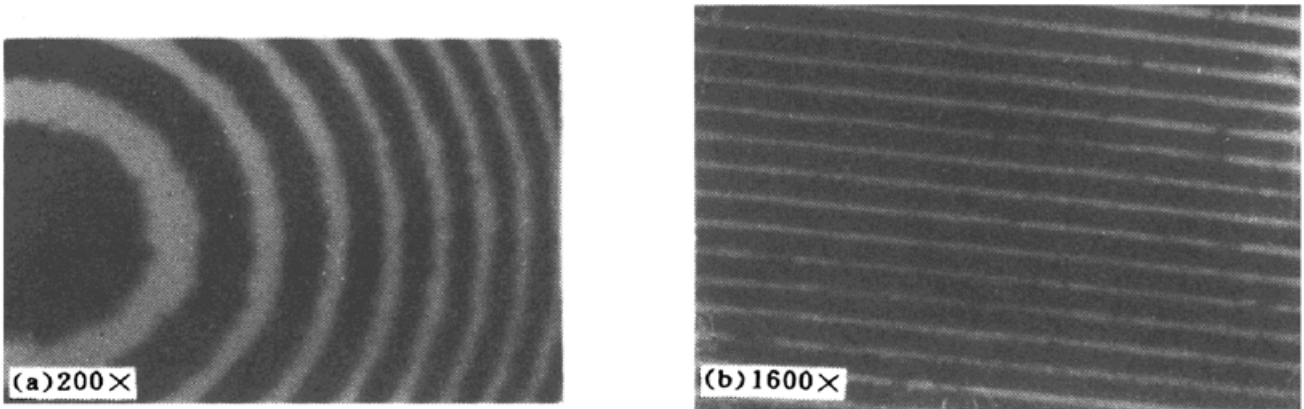


Fig. 2 Microscopic picture of the inner (a) and outer (b) part of the multilayer zone plate

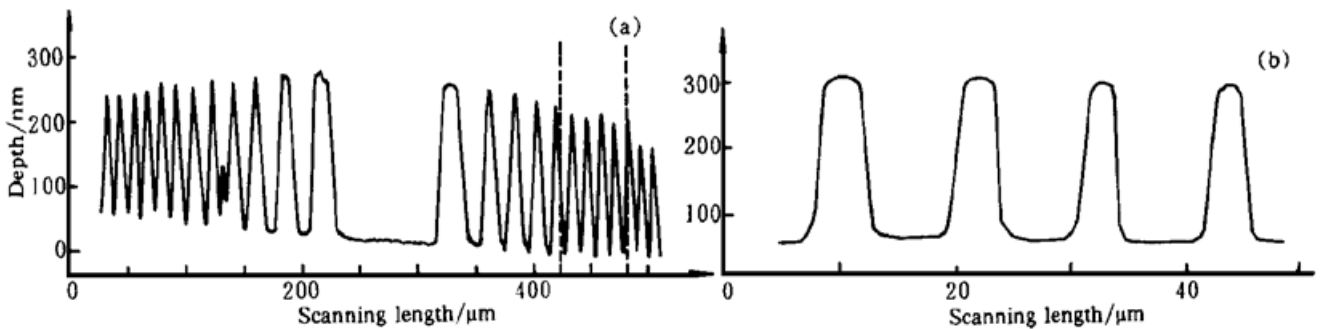


Fig. 3 Measured result of multilayer zone plate profile with a stylus profilometer of Talystep

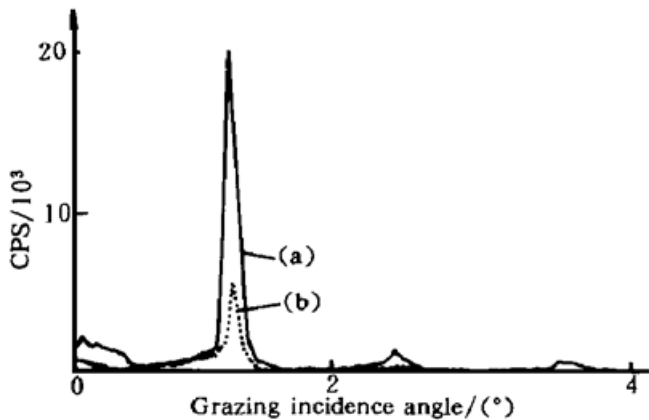


Fig. 4 Measured small angle X-ray diffraction of the Mo/Si multilayer before preparation (a) and after preparation (b)

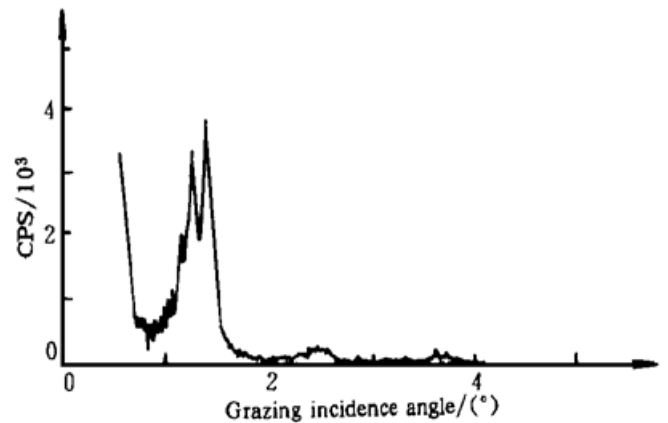


Fig. 5 Measured small angle X-ray diffraction of the Mo/Si multilayer zone plate with remained multilayer removed

参 考 文 献

- [1] Schneider G, Wilhein T, Niemann B *et al.*. X-ray microbeam technology and applications. *Proc. SPIE*, 1995, **2516** : 90~ 101
- [2] Spiller E. *Soft X-Ray Optics*. 1994, SPIE Press
- [3] Aristov V V, Gaponov S V, Genkin V M *et al.*. Focusing properties of profiled X-ray multilayer mirrors. *JETP Lett.*, 1986, **44**(3) : 265~ 267
- [4] Dhez P, Erko A, Khzmalian E *et al.*. Kirkpatrick-baez microscope based on a Bragg-Fresnel X-ray multilayer focusing system. *Appl Opt.*, 1992, **31**(31) : 6662~ 6667
- [5] Erko A, Agafonov Yu, Panchenko L A *et al.*. Elliptical multilayer Bragg-Fresnel lenses with submicron spatial resolution for X-rays. *Opt. Commun.*, 1994, **106**(4) : 146~ 150
- [6] Chevallier P, Dhez P. First test of the scanning X-ray microprobe with Bragg-Fresnel multilayer lens at ESRF beam line. *Nucl. Instrum. & Methods.*, 1995, **354**(2-3) : 584~ 587
- [7] Holldack K, Erko A I, Peatman W B. Bessy Bragg-Fresnel multilayer beam monitors. *Proc. SPIE*, 1995, **2516** : 210~ 216
- [8] Sammar A, Ander J M. Dynamical theory of stratified Fresnel linear zone plates. *J. Opt. Soc. Am. (A)*, 1993, **10**(11) : 2324~ 2337
- [9] Mirone A, Idir M, Dhez P *et al.*. Dynamical theory for Bragg Fresnel multilayer lenses for X-UV and X-ray range. *Opt. Commun.*, 1994, **111**(3/4) : 191~ 198
- [10] Khanmalek C, Moreno T, Guerin Ph *et al.*. Fabrication of multilayer Bragg-Fresnel zone plates for the soft X-ray range. X-Ray/EUV Optics for Astronomy, Microscopy, Polarimetry, and Projection Lithography. *Proc. SPIE*, 1990, **1343** : 56~ 61
- [11] 曹健林, 马月英, 张俊平等. 软 X 光激光用多层膜反射镜的制备与检测. *中国激光*, 1995, **22**(6) : 465~ 470
- [12] 付绍军, 洪义麟, 陶晓明. 离子束刻蚀技术在衍射元件制作中的应用. *光子学报*, 1994, **23**(Z2) : 101 ~ 104

Experimental Investigation of X-Ray Bragg-Fresnel Optics

Wang Zhanshan Ma Yueying Lu Junxia Gao Honggang

Liu Yinan Pei Shu Cao Jianlin

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

Xu Xiangdong Hong Yilin Fu Shaojun

(National Synchrotron Radiation Laboratory, University of Science and Technology of China, Hefei 230026)

(Received 4 January 1998; revised 27 April 1998)

Abstract The multilayered X-ray Bragg-Fresnel optics is fabricated with the zone plate profile formed on the photoresist on a surface of multilayer mirror by optical holography and followed by ion beam etching into the multilayer mirror. The measured results of the fabricated Bragg-Fresnel optics are presented. The measured results show that the method is suitable for making Bragg-Fresnel optics.

Key words X-ray Bragg-Fresnel optics, multilayer coating, zone plate, ion beam etching.