

离子束刻蚀软 X 射线透射光栅实验研究

傅绍军 洪义麟 陶晓明 苏永刚

(中国科技大学国家同步辐射实验室, 合肥 230026)

唐永建 郑志坚 唐道源

(中国工程物理研究院核物理与化学研究所, 成都 610003)

提 要

利用全息-离子束刻蚀方法研制出了聚酰亚胺薄膜为衬底的金软 X 射线透射光栅。研究了光栅制作中曝光量、显影条件和离子束刻蚀工艺等因素对光栅参数的影响, 并给出了在惯性约束激光核聚变实验研究中的应用结果。

关键词 离子束刻蚀, 软 X 射线透射光栅。

1 引 言

金透射光栅是近年来新发展起来的软 X 射线波段的色散元件^[1~5], 广泛地应用于 X 射线激光, 惯性约束激光核聚变和同步辐射等领域的光谱测量^[6~14]。

透射光栅的优点是能谱分辨好, 衍射效率高, 与高时间分辨的扫描相机配合, 可对快变 X 光源作时间分辨测量, 与针孔成像装置配合, 可进行 X 光源空间分辨能谱测量。

我们采用全息光刻和离子束微细加工技术成功地研制出了 853 l/mm 和 880 l/mm 的以聚酰亚胺为衬底的金透射光栅, 并多次用于惯性约束聚变的实验研究。

2 软 X 射线透射光栅特性

软 X 射线透射光栅的衍射效率除了实验上可以直接测量外, 理论上也有若干模型可以模拟计算^[15], 通常多采用 Schnopper 模型。这个模型是假定光栅条纹截面为矩形, 如图 1 所示。根据这个模型, 光栅的零级和第 m 级的衍射效率可以写成

$$\eta_0 = (b/d)^2 + [1 - (b/d)]^2 \exp(-qzk) + 2(b/d)[1 - (b/d)] \times \exp(-qzk) \cos(qz\delta), \quad (1)$$

$$\eta_m = \left[\frac{\sin(Mm\pi)}{M \sin(m\pi)} \frac{\sin(m\pi b/d)}{m\pi} \right]^2 \times [1 + \exp(-2qzk) - 2 \exp(-qzk) \times \cos(qz\delta)], \quad (2)$$

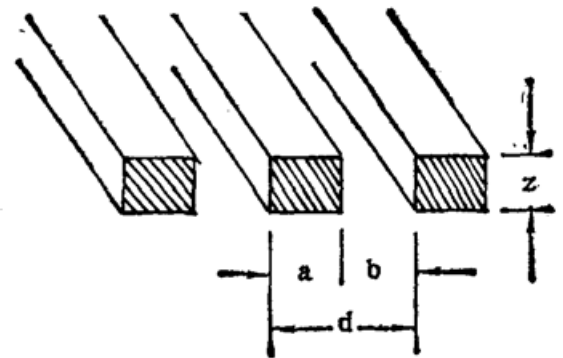


Fig. 1 End view and parameters of an ideal rectangular grating with thickness (s), periodicity (d), bar width (a) and space width (b)

式中 m 是衍射级次, M 为光栅刻线总数, q 为入射光波数, k 为金的复折射率的虚部, $n=1-\delta$ 是折射率的实部. 从(2)式可见, 透射光栅的衍射效率取决于光栅的基本参数(b/d)和光栅线厚度 z , 而衍射效率随波长 $\lambda(=2\pi/q)$ 的变化特性主要由光栅线材料本身(δ, k)对 X 光吸收效应决定.

参考文献[6]详细地分析了衍射效率随(b/d)和 z 的变化情况, 在 z 和 λ 确定时, 除零级外, 各衍射级的效率随(b/d)的变化是对 $b/d=0.5$ 呈偶对称分布. 在 $0 \leq (b/d) \leq 1$ 范围内, 有 m 个极大值, $m+1$ 个零值; 当 b/d 和 λ 确定时, 衍射效率随 z 的变化呈阻尼振荡形式.

3 光栅制作工艺

软 X 射线透射光栅是一种薄膜型色散元件, 由对软 X 射线足够透明的聚酰亚胺薄膜作为衬底, 等宽平行的金线条构成光栅. 制备过程如图 2 所示.

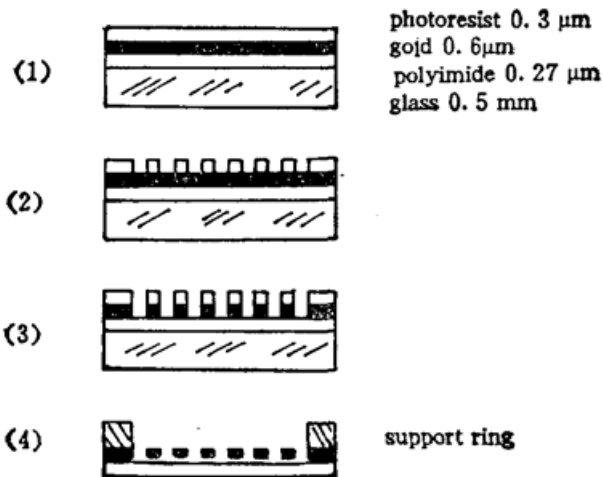


Fig. 2 Fabrication process of soft X-ray transmission grating using holographic exposure and ion beam etching

离子束刻蚀是在离子束刻蚀机中进行的. 以光刻胶的光栅图形为掩模, 用离子束把光刻胶的光栅图形刻到金膜上, 形成金的光栅.

3.4 去除玻璃基底

玻璃基底只是在光栅制作过程中起支撑作用的. 最后要去掉. 先把加工好的金属环粘到光栅上, 然后用氢氟酸腐蚀掉玻璃.

4 实验结果与讨论

在光栅制作过程中, 光刻胶光栅掩模截面形状的控制最为重要. 根据离子束刻蚀的要求, 理想的光刻胶掩模条纹截面形状应如图 3 所示.

光刻胶光栅掩模条纹截面形状主要由光刻胶厚度、曝光量及显影条件等来决定. 通常实验中固定光刻胶厚度和显影条件, 通过调节曝光量来控制光栅条纹的线空比 a/b , 进而实现图 3 所示的理想情况. 为了获得最佳曝光条件, 并具有良好的重复性, 首先测出了光刻胶的特征曲线如图 4 所示, 选择合适的曝光量, 使其处于特征曲线的线性区内.

3.1 基片制备

在经过抛光和清洁处理的玻璃片上依次制备出聚酰亚胺薄膜, 金膜和 AZ1350 光刻胶层.

3.2 全息曝光

光栅图形是利用氩离子激光(波长 457.9 nm)在光刻胶上全息曝光产生的. 把基片放在由两个平面波叠加产生的光栅图形的干涉场中曝光, 用 0.5% 的 NaOH 溶液显影, 便得到光刻胶的浮雕光栅图形.

3.3 离子束刻蚀

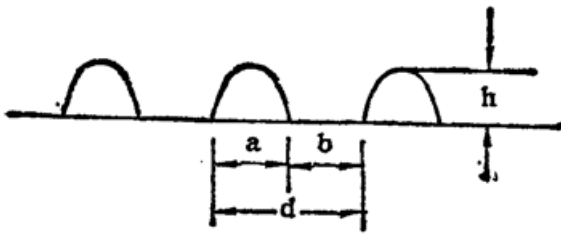


Fig. 3 Schematic of the profile of an ideal relief grating mask

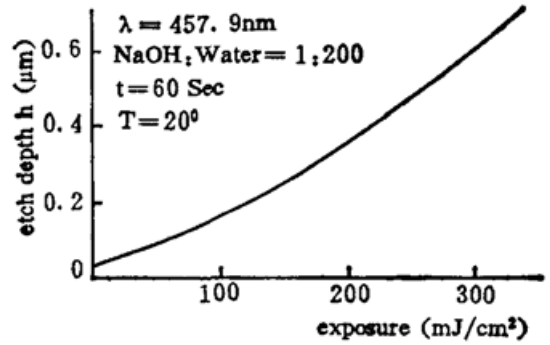


Fig. 4 The exposure characteristic curve of the photoresist

设两干涉光强度分别为 I_1 和 I_2 , 则光刻胶面上的总光强为^[16]

$$I_0(x) = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos(2\pi x/d), \tag{3}$$

当等光强干涉时, 即 $I_1 = I_2$, 则曝光量为

$$I_0(x)t = 2I_2[1 + \cos(2\pi x/d)] \cdot t, \tag{4}$$

式中 t 为曝光时间. 图 5(a) 给出了曝光量在光刻胶面上的空间分布. 由于 AZ1350 是正性光刻胶, 即曝光部分显影后光刻胶被溶解, 因此当曝光量等于光刻胶灵敏度 Q (即在一定显影条件下, 将一定厚度的胶层去除所需的曝光量) 时光栅条纹截面形状如图 5(b) 所示, 曝光量等于 $2Q$ 时, 可得到线空比为 1:1 的光栅条纹.

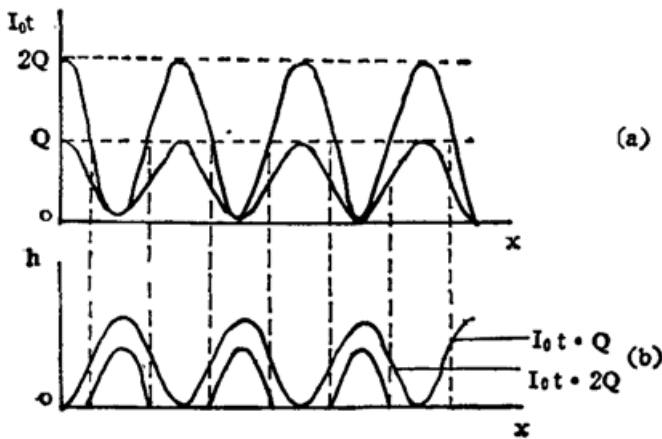


Fig. 5 The dependence of relief grating profile on the exposure

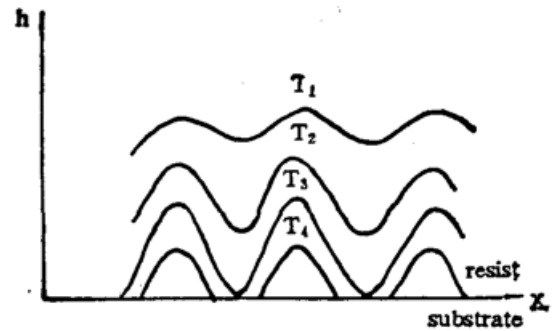


Fig. 6 The dependence of relief grating profile on the development times (T) $T_1 < T_2 < T_3 < T_4$

实际上也可以固定曝光量和其它条件, 只通过控制显影时间来达到控制线空比的目的, 如图 6 所示.

图 7 是 880 l/mm 的光刻胶浮雕光栅掩模条纹截面的 SEM 照片, 可见已经非常接近于图 3 所示的理想情况.

我们已经研制出了 853 l/mm 和 880 l/mm 的两种聚酰亚胺衬底的金透射光栅, 线空比为 1:1, 适用波段 0.8~15.0 nm. 在成都核物理与化学研究所 LF-11 高功率激光装置和上海光机所 LF-12 装置上进行了黑洞靶时间分辨和空间分辨的实验研究, 金平面靶的 X 射线能谱测量等实验研究, 取得了一系列实验结果^[17~18]. 图 8 和图 9 是透射光栅及其应用的部分结果.

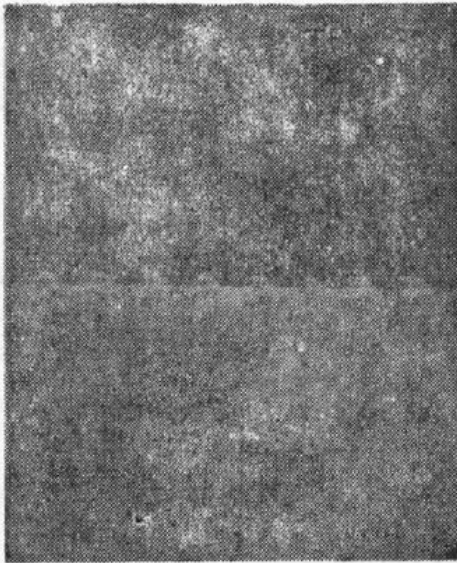


Fig. 7 The profile of the relief grating ($\times 10000$)

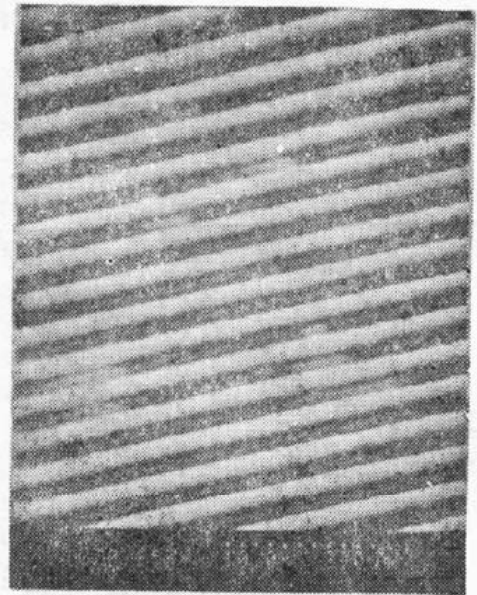


Fig. 8 SEM photograph of a 880 grooves/mm gold transmission grating ($\times 10000$)

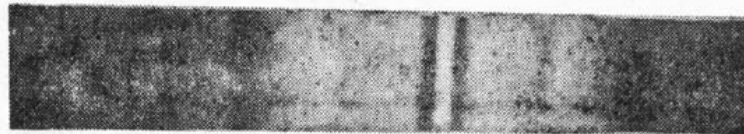


Fig. 9 X-ray spectra for a gold planar target

参 考 文 献

- [1] J. H. Dijkstra, L. J. Lantwaard, Holographic construction of open structure, dispersion transmission grating. *Opt. Commun.*, 1975, **15**(2): 300~305
- [2] E. T. Arakawa, P. J. Caldwell, *Nucl. Instrum. & Meth.*, 1980, **172** (1-2): 293~296
- [3] P. Tatchyn, I. Lindau, *Nucl. Instrum. & Meth.*, 1980, **172** (1-2): 287~291
- [4] N. M. Ceglio, X-ray Microscopy. G. Schmahl, D. Rudolph Ed., Springer Heidelberg: *Springer Series in Optical Sciences*, 1984, **43**: 97~108
- [5] J. P. Delvaille, H. W. Schnopper, *Nucl. Instrum. & Meth.*, 1980, **172** (1-2): 281~285
- [6] 李跃林, 白文安, 陈时胜等. 针孔透射式光栅光谱仪衍射效率的理论模拟. *光学学报*, 1989, **9**(6): 550~555
- [7] 王晓方, A. Pachtmann, 徐至展等. 5~200 Å 范围激光等离子体 X 射线辐射特性研究. *物理学报*, 1990, **39** (6): 922~926
- [8] A. M. Hawryluk, N. M. Ceglio, J. Melngailis, *et al.*, Gold transmission gratings with submicrometer periods and thicknesses $>0.5 \mu\text{m}$. *J. Vac. Sci. Technol.*, 1981, **19** (4): 897~900
- [9] N. M. Ceglio, R. L. Kauffman, A. M. Hawryluk *et al.*, Time-resolved X-ray transmission grating spectrometer for studying laser-produced plasmas. *Appl. Opt.*, 1983, **22** (2): 318~327
- [10] T. Mochizuki, T. Yabe, K. Okada *et al.*, Atomic-number dependence of soft-X-ray emission from various targets irradiated by a 0.53- μm -wavelength laser. *Phys. Rev. (A)*, 1986, **33** (1): 525
- [11] 王晓方, A. Pachtmann, 徐至展等. X 射线透射光栅谱仪用于激光等离子体辐射特性的研究 I. 实验基础. *中国激光*, 1990, **17** (7): 407~411
- [12] 李跃林, 徐至展, 陈时胜等. 半圆柱壳槽靶的激光等离子体软 X 射线光谱发射特点的研究. *光学学报*, 1990, **10** (7): 581~585
- [13] 王晓方, 陈时胜, 徐至展等. 针孔透射光栅谱仪用于线聚焦激光等离子体研究. *物理学报*, 1990, **39** (5): 764~769
- [14] H. Aritome *et al.*, *Nucl. Instr. & Meth.* 1983, **208**: 233~236
- [15] H. W. Schnopper, L. P. Van Speybroeck, J. P. Delvaille *et al.*, Diffraction grating transmission efficiencies for XUV and soft X rays. *Appl. Opt.*, 1977, **16** (4): 1088~1091
- [16] 傅新定, 郑延芳, 陈莉芝等. 反应离子束微细加工全息闪耀光栅研究. *光学学报*, 1985, **5** (1): 43~49
- [17] 唐永建, 郑志坚, 何海恩等. 激光等离子体软 X 射线辐射能谱时间分辨测量研究. *光学学报*, 1991, **11** (5):

438~443

[18] 丁耀南,何海恩,姚震宇等. 透射光栅时间分辨谱仪. 强激光与粒子束, 1991, 3 (2): 237~241

Investigation of soft X-ray transmission grating made by ion beam etching technique

FU SHAOJUN HONG YILIN TAO XIAOMING SU YONGGANG

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

TANG YONGJIAN ZHENG ZHIJIAN TANG DAUYUAN

(Institute of Nuclear Physics and Chemistry, China Academy of Engineering Physics, Chengdu 610003)

(Received 9 September 1991; revised 18 November 1991)

Abstract

Soft X-ray gold transmission grating with polyimide membrane substrate is fabricated by holograph-ion beam etching technique. The exposure, development and etch conditions for fabricating grating are investigated and its experimental results used in inertial confinement fusion are given in this paper.

Key words ion beam etching, soft X-ray transmission grating.