

文章编号: 0253-2239(2010)06-1857-04

2000 lp/mm X 射线透射变栅距光栅的研究

靳飞飞^{1,2} 朱效立¹ 李海亮^{1,2} 马 杰¹ 谢常青¹ 刘世炳²

(¹ 中国科学院微电子研究所纳米加工与新器件集成技术重点实验室, 北京 100029)

² 北京工业大学激光工程研究院, 北京 100022

摘要 针对 X 射线透射光栅摄谱仪中对高线密度聚焦变栅距光栅的需要, 利用电子束光刻技术, 研制了 X 射线透射变栅距光栅。利用变栅距光栅的自动生成宏文件程序, 优化设计了变栅距光栅的版图, 然后利用电子束光刻和微电镀技术在聚酰亚胺薄膜底衬上制备了 X 射线透射变栅距光栅。制作出中心线数为 2000 lp/mm X 射线透射变栅距光栅, 栅距变化符合设计要求。衍射效率标定的结果表明, 制备的变栅距光栅在中心波长处聚焦作用明显, 可以大幅提高衍射光强度和光栅的分辨本领, 具有重要的应用价值。

关键词 衍射光学; 变栅距光栅; X 射线透射光栅; 电子束光刻

中图分类号 TN405 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20103006.1857

Study on Properties of 2000 lp/mm X-Ray Transmission Varied Line-Space Gratings

Jin Feifei^{1,2} Zhu Xiaoli¹ Li Hailiang^{1,2} Ma Jie¹ Xie Changqing¹ Liu Shibing²

(¹ Key Laboratory of Nano-Fabrication and Novel Devices Integrated Technology, Institute of Microelectronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

² Institute of Laser Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100022, China

Abstract The manufacture of high-line-density X-ray transmission self-focusing varied line-space (VLS) gratings for X-ray spectroscopy by using electron beam lithography is reported. Firstly, the VLS gratings are automatically optimized and generated by the macro program. Then using the electron beam lithography and micro-electroplating technology, the VLS gratings are fabricated on polyimide membrane substrate. The 2000 lp/mm X-ray transmission VLS gratings are successfully obtained. It can be seen that the line space of the gratings are all desired. The calibration results of diffraction efficiency of the VLS gratings indicate that the VLS gratings have promising abilities to significantly improve the diffraction intensity and spectrum resolution in the central wavelength.

Key words diffraction optics; varied line-space gratings; X-ray transmission gratings; electron beam lithography

1 引 言

X 射线透射光栅广泛应用于 X 射线透射谱仪、激光等离子体诊断^[1]方面。X 射线透射变栅距光栅除了具有普通等栅距光栅的色散作用外, 还具有相差校正和自聚焦^[2]的作用, 因此在很多方面变栅距光栅衍射特性优于普通的等栅距光栅, 其最主要的应用是在 X 射线光栅光谱仪^[3~5]上。美国发射的 EUVE(Extreme Ultraviolet Explorer)^[6]上, 其光谱

仪就采用了加州大学伯克利分校空间科学实验室设计的三块平面变栅距光栅, 用于在深空探测望远镜的焦平面上聚焦光谱像。

变栅距光栅的传统制作工艺主要有机械刻划和全息光刻两种。时轮等^[7]介绍了变栅距光栅的工作原理和机械刻划变栅距光栅的制作; 楼俊等^[8]介绍了变栅距光栅的光谱分辨研究和全息变栅距光栅的设计制作^[9,10]。

收稿日期: 2009-06-15; 收到修改稿日期: 2009-08-25

基金项目: 国家 973 计划(2007CB935302)和国家重大专项(2008ZX02051-005)资助课题。

作者简介: 靳飞飞(1983—), 男, 硕士研究生, 主要从事 X 射线光谱仪器方面的研究。E-mail: jff1983@126.com

导师简介: 谢常青(1971—), 男, 研究员, 主要从事衍射光学元件方面的研究。E-mail: xiechangqing@ime.ac.cn

电子束光刻技术制备变栅距光栅^[11]是一种主动栅距变化制备变栅距光栅的方法,能制备各种栅距和模式变化的变栅距光栅。由于变栅距光栅栅距制备的特异性,使得在制作变栅距光栅前都要对其进行设计。制备过程中首先根据衍射^[12]需要设计出变栅距光栅的栅距变化模式,再调用软件绘制变栅距光栅的版图,最后根据版图图形进行电子束光刻和微电镀技术制作出变栅距光栅。

2 变栅距光栅的设计与制作

变栅距光栅的核心是栅距的变化,其周期变化满足

$$d_i = d_0(1 + Ax + Bx^2 + Cx^3),$$

式中 d_i 为第 i 条光栅的栅距, d_0 为初始栅距, x 为栅线数, A, B, C 为系数。制作变栅距光栅要设计出光栅的

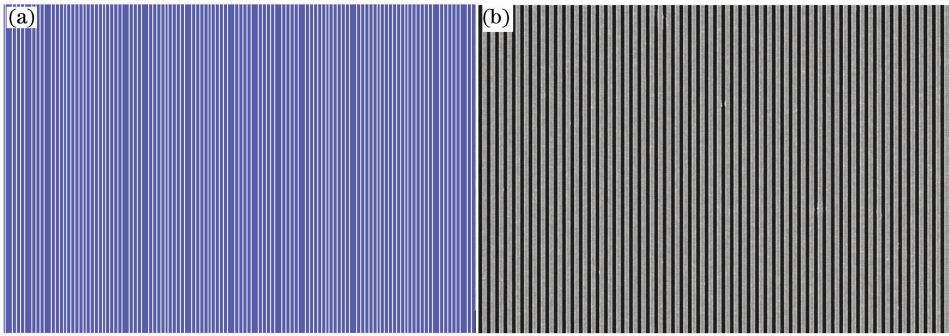


图 1 (a) 2000 lp/mm 变栅距光栅的掩膜图片; (b) 2000 lp/mm 变栅距光栅的扫描电镜照片

Fig. 1 (a) Mask picture of the 2000 lp/mm VLS gratings; (b) SEM picture of the 2000 lp/mm VLS gratings

变栅距光栅的制作是通过电子束光刻和光学光刻相结合的办法完成。在硅基片上依次制备聚酰亚胺薄膜和铬金电镀种子层;旋涂聚甲基丙烯酸甲酯 (PMMA) 光刻胶;进行电子束曝光;再电镀 $2 \mu\text{m}$ 厚的金层;将 PMMA 光刻胶溶解;刻蚀去除裸露的电镀种子层;此时变栅距光栅的栅线部分已经制备完成。制备变栅距光栅的薄膜本身是透光的,利用紫外光刻将薄膜的非光栅线条部分遮盖。紫外光刻的工艺是在制备好的光栅表面旋涂 $2.4 \mu\text{m}$ 厚的抗蚀剂;采用紫外光刻将光栅的栅线部分图形覆盖;再电镀 $2 \mu\text{m}$ 厚的金层;用丙酮将光栅表面的抗蚀剂去除,这样 X 射线透射变栅距光栅的全部制备完成。

3 光栅的检测和特性分析

图 2 是制作出的中心线数为 2000 lp/mm 的变栅距光栅的同视场下不同位置三幅扫描电镜照片。从照片中能明显地看出光栅栅距的变化,光栅栅距

栅距的变化模式,即确定(1)式中的各次项系数。其中 $d_0 = 470 \text{ nm}$, $A = 9.55 \times 10^{-5}$, $B = 5.2 \times 10^{-8}$, $C = 0$ 。变栅距光栅中心线数为 2000 lp/mm,中心栅距为 500 nm,光栅的面积为 $0.5 \text{ mm} \times 0.5 \text{ mm}$ 。光栅实际占空比始终为 1:1。

利用 L-Edit 软件调用自主编写的变栅距光栅图形生成 VC++ 宏文件可以生成变栅距光栅的版图。图 1(a)是设计的变栅距光栅的 L-Edit 版图一部分,从栅距的不规则变化可以看出栅距的变化满足遗传学公式,是一种高次的曲线的栅距变化模式。图 1(b)为制作的变栅距光栅的扫描电镜 (SEM) 照片,由于视场很小从照片中无法看出光栅栅距的变化,这就是加工变栅距光栅的主要难点,变栅距光栅的每两条光栅的栅距都不一样,光栅的栅距变化值很小,一般整体的加工办法无法实现这种精细加工。

和狭缝的大小和变化基本符合设计版图要求的线条大小。图 2(a)为光栅的最窄处的 SEM 照片,栅距为 470 nm 左右;图 2(b)为光栅的中心栅距附近的 SEM 照片,栅距大小为 500 nm 左右;而图 2(c)为光栅栅距最宽处的 SEM 照片,栅距为 540 nm 左右。制作出的光栅的栅距的变化与计算值一致。

为了检测制作的变栅距光栅的衍射特性,在合肥国家同步辐射实验室的光谱辐照和计量实验站进行了该光栅的衍射特性实验。制作的变栅距光栅只有栅线部分可以透过 X 射线,非栅线部分均由 $2 \mu\text{m}$ 厚的金层覆盖可以阻隔 X 射线。将同步辐射出来的 X 射线正入射到变栅距光栅上,由扫描硅光二极管探测各级衍射光信号。图 3(a)为变栅距光栅对 5 nm 波长的同步辐射光的衍射光强的扫描图。图中的三个峰值分别为变栅距光栅零级衍射光和正负一级衍射光。

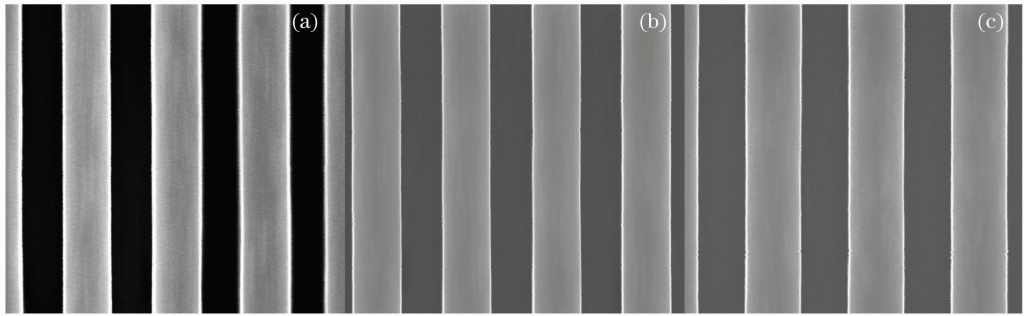


图 2 同视场 2000 lp/mm 变栅距光栅扫描电镜图

Fig. 2 SEM pictures of 2000 lp/mm VLS gratings in the same scope

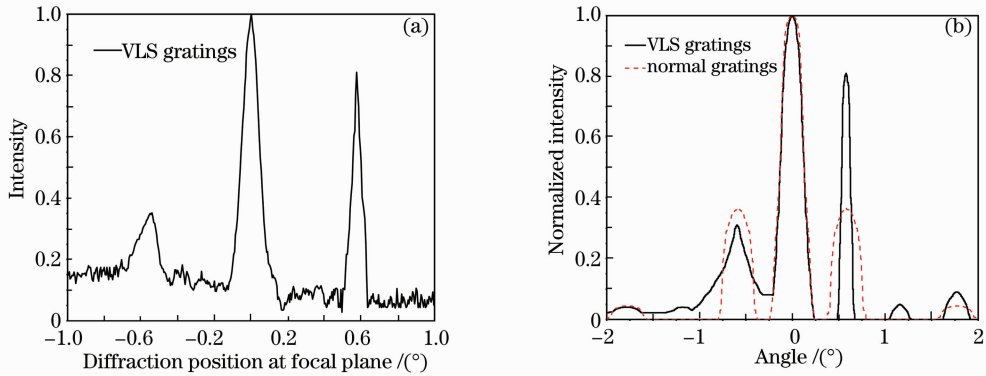


图 3 (a)变栅距光栅衍射光强扫描图;(b)变栅距光栅和等栅距光栅归一化衍射光强对比图

Fig. 3 (a) Scanning diffraction intensity of the VLS gratings; (b) normalized intensity comparison of the VLS gratings and normal gratings

从衍射光强图可以看出,变栅距光栅与普通的等栅距光栅的衍射效果并不相同,由于光栅栅距的变化,变栅距光栅对一侧的衍射光出现聚焦作用,对另一侧的对衍射光具有发散作用。实验数据可知,正一级衍射峰与零级衍射峰之比为 82.21%,负一级衍射峰与零级衍射峰之比为 34.58%。测量变栅距光栅入射光的线宽是 500 μm,其正一级衍射的线宽只有 200 μm 左右,它对一级衍射光的线宽有压缩作用,而负一级衍射光的线宽被展的很宽,在整个负衍射级次都有光信号存在。

在信号很弱的真空紫外和 X 射线波段,材料的吸收作用非常明显,这个波段的光谱分析时通常采用透射式衍射光栅。普通透射光栅的 X 射线谱仪的衍射信号较弱,同时准直聚焦系统的设计和加工难度较大,如能使用变栅距光栅代替普通的栅距光栅,即可大幅度提高衍射光强和压缩带宽,进而将大大提高光谱分辨率。

对线密度为 2000 lp/mm 的等栅距透射光栅和中心线数为 2000 lp/mm 变栅距透射光栅进行了衍射实验对比,两种光栅的衍射光强归一化对比结果如图 3(b)所示。与等栅距光栅相比,变栅距光栅可

将正一级衍射光强提高一倍,同时带宽是等栅距光栅的 40%左右。变栅距光栅对于衍射光强的提高和对带宽的压缩,使得它的分辨率大大高于普通的等栅距光栅。通过使用变栅距光栅,可在普通等栅距光栅衍射下无法分辨的光谱,在变栅距光栅的衍射下实现分辨。

4 结 论

采用电子束光刻结合光学光刻和微电镀技术,成功研制了中心线数为 2000 lp/mm 变栅距的 X 射线透射光栅。通过精确控制光栅栅距的变化,使得制备的光栅与设计的光栅线密度变化基本一致,可见这种方法可以制作任意变栅距光栅,是制作变栅距光栅的有效方法之一。通过衍射实验证明 X 射线透射变栅距光栅,可以大幅提高衍射光强和光谱分辨率。

参 考 文 献

1 Wang Wei, Yang Houmin. Principle and design of varied line-space plane gratings[J]. *Acta Optica Sinica*, 1999, **19**(9): 1158~1162
王 炜, 杨厚民. 平面变栅距光栅的原理及设计[J]. *光学学报*,

- 1999, **19**(9): 1158~1162
- 2 Li Ruxin, Fan Pinzhong, Xu Zhizhan *et al.*. Imaging characteristics of the flat-field grating[J]. *Chinese J. Lasers*, 1994, **A21**(8): 667~672
李儒新, 范品忠, 徐至展等. 平焦场光栅的成像特性[J]. 中国激光, 1994, **A21**(8): 667~672
- 3 Michael C. Hettrick, Stuart Bowyer. Variable line-space gratings: new designs for use in grazing incidence spectrometers [J]. *Appl. Opt.*, 1983, **22**(24): 3921~3924
- 4 Michael C. Hettrick, Stuart Bowyer, Roger F. Malina *et al.*. Extreme ultraviolet explorer spectrometer [J]. *Appl. Opt.*, 1985, **24**(12): 1737~1756
- 5 Liu Yaqing, Fan Pinzhong, Xu Zhizhan. Novel usage of a flat-field grating spectrograph [J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, **20**(7): 879~882
刘亚青, 范品忠, 徐至展. 平焦场光栅光谱仪的新用法[J]. 光学学报, 2000, **20**(7): 879~882
- 6 Bowyer Stuart. The unique variable line space spectrometers on the EUVE satellite: in-flight performance and selected scientific results [C]. *SPIE*, 1995, **2517**: 97~106
- 7 Shi Lun, Hao Defu. Theory and applications of varied line-space gratings [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2001, **9**(3): 284~287
时 轮, 郝德阜. 变栅距衍射光栅的原理及应用[J]. 光学精密工程, 2001, **9**(3): 284~287
- 8 Liu Zhengkun, Tan Xin, Xu Xiangdong *et al.*. Study on resolving power of varied line-space grating [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2008, **16**(7): 1153~1157
刘正坤, 谭 鑫, 徐向东等. 变栅距光栅光谱分辨研究[J]. 光学精密工程, 2008, **16**(7): 1153~1157
- 9 Lou Jun, Fu Shaojun, Liu Zhengkun *et al.*. Study on position sensor of holographic variable line-space plane gratings [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(4): 655~658
楼 俊, 付绍军, 刘正坤等. 全息平面变间距光栅位移传感器研究[J]. 光子学报, 2007, **36**(4): 655~658
- 10 Zhu Xiangbing, Chen Jin, Deng Shanxi *et al.*. Fabrication of varied-line-space plane gratings and wave fronts inspection [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(1): 72~75
朱向冰, 陈 瑾, 邓善熙等. 平面变线密度光栅的制作和波前检测[J]. 中国激光, 2006, **33**(1): 72~75
- 11 Zhu Xiaoli, Ma Jie, Xie Changqing *et al.*. Fabrication of 3333 lp/mm soft X-ray transmission gratings [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(6): 1026~1030
朱效立, 马 杰, 谢常青等. 3333 lp/mm X射线透射光栅的研制[J]. 光学学报, 2008, **28**(6): 1026~1030
- 12 Yang Jiamin, Yi Rongqing, Chen Zhenglin *et al.*. Study of transmission grating diffraction efficiencies for soft X-ray [J]. *Acta Physica Sinica*, 1998, **47**(4): 613~618
杨家敏, 易荣清, 陈正林等. 透射光栅对软 X射线衍射效率的研究[J]. 物理学报, 1998, **47**(4): 613~618