

电子束和 X 射线光刻制作高分辨率微波带片*

王德强^{1,†} 曹磊峰² 谢常青¹ 叶甜春¹

(1 中国科学院微电子研究所 微细加工与纳米技术实验室, 北京 100029)

(2 中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 绵阳 621900)

摘要: 在硅为衬底材料的自支撑氮化硅薄膜上, 采用阴阳图形互换转移技术, 先使用电子束直写方法制作成功了最外环为 150nm 的阳图形微波带片, 然后用同步辐射 X 射线光刻技术复制成功了最外环为 150nm 的阴图形微波带片, 得到可以应用于 ICF 诊断技术中的微波带片。

关键词: 电子束; X 射线光刻; 微波带片; 菲涅耳波带片

PACC: 4238; 4290

中图分类号: TN305.7

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2006)06-1147-04

1 前言

在惯性约束聚变(ICF)中, 微米、亚微米级空间分辨的 X 光成像技术是很重要的等离子体诊断技术之一. 通过获得靶的 X 光产生机制、发射特性、输运状态和温度空间分布信息, 还可得到内爆动力学方面的压缩对称性、体积压缩比以及与聚爆有关的其他等离子体参数的空间分布数据, 为等离子体物理的研究和靶型的设计提供依据^[1]. 目前用于 ICF 实验中高分辨靶源辐射成像的方法主要有: 针孔成像^[2,3]、掠入射显微成像^[2]、编码成像、波带片成像^[4]等. 前三种成像技术完全基于几何光学理论和严格限制高级衍射, 所以他们的分辨率都不能达到深亚微米的水平, 文献报道可以达到 $5\mu\text{m}$ 的空间分辨率^[4], 目前只有微波片成像技术可以满足人们对高分辨率的要求.

微波带片是一种特殊的光学透镜, 它是通过衍射特性对光束进行聚焦的, 不是利用器件对光的折射特性进行工作. 它包含交替变化的透明和不透明区域, 这些区域分布满足这样一个条件: 对于一个单色平行的入射光束, 其形成的焦距为 f . 这些连续的区域边界到中心点的距离满足如下关系: $r_n^2 = l_n^2 - f^2$, 其中 $l_n = f + n\lambda/2$, 所以 $r_n^2 = nf\lambda + n^2(\lambda^2/4)$, 这里 n 是微波带片的级数, λ 是入射光波长, l_n 为第 n 个边界到达聚焦点 f 的距离, r_n 为第 n 个边界处到中心点的距离. 在很多情况下 $f \gg \frac{1}{4n\lambda}$, 所以上

述公式可以近似写为: $r_n \approx \sqrt{n\lambda f}$.

波带片成像技术能够获得深亚微米、纳米级的实验水平. 微聚焦波带片成像和其他方法相比, 具有空间分辨率高、聚光效率高、应用范围广等特点. 这种成像技术的分辨率完全依赖于微波带片最外环的宽度, 通常系统所能获得的极限分辨率是微波带片最外环宽度的 1.22 倍. 如果波带片的最外环宽度是 25nm, 就可以达到 30nm 的高空间分辨率. 目前, 可以应用于 ICF 诊断实验的微波带片最外环宽度国外报道为 100nm^[5], 已经应用到 ICF 诊断实验的微波带片最外环宽度是 170nm^[6], 国内过去能够得到的微波带片最外环分辨率最好为 465nm^[7]. 根据目前国内对 ICF 诊断实验的迫切需求, 制作成功了最外环宽度是 150nm 的微波带片.

2 制作方法

微波带片制作方法主要有机械刻划、激光全息光刻、电子束直写等^[8]. 机械刻划条件极为苛刻, 不仅时间长而且精度不高, 很难刻划出亚微米的线条. 激光全息光刻虽然能够制作出深亚微米水平的微波带片, 但是它的控制精度和分辨率不能与电子束直写相比较. 目前世界上主要利用电子束直写来制作微波带片. 电子束制作可以制作出纳米级的高分辨率图形, 但是不能够制作高宽比的图形. 对于微波带片的制作, 采用阴阳图形互换技术, 即电子束直写和同步辐射 X 射线光刻技术混合的光刻方法, 充分利用上述两种光刻技术的优点, 避免他们各自的缺点,

* 国家自然科学基金(批准号: 60276019), 国家高技术研究发展计划(批准号: 2004AA843082)和教育部“同步辐射创新中心”研究生创新基金资助项目

† 通信作者. Email: wangdeqiang@ime.ac.cn

2005-09-08 收到, 2005-12-20 定稿

先使用电子束直写方法制作低宽比的阳图形(大面积为透光图形)微波带片,然后用同步辐射 X 射线光刻技术复制高宽比的阴图形(大面积为不透光图形)微波带片。

JBX 5000LS 电子束曝光机的图形书写采用矢量扫描方式,其基本曝光图形有矩形和多边形,每个芯片的图形以栅格结构划分,一个栅格称为一个场,每个场再划分为子场进行扫描曝光。使用 JBX 5000LS 系统时,选用不同的加速电压和物镜,场和子场的划分也不同。扫描控制单元内有两对分别为 16 位和 12 位的 D/A 转换器,其中一个 16 位的 D/A 转换器控制场扫描,而另外一个 12 位的 D/A 转换器控制场内扫描^[9]。

同步辐射 X 射线之所以被用于光刻,是因为 X 射线能在很厚的材料上定义出分辨率非常高的图形。由于 X 射线波长极短,为 0.01~10nm 数量级,因此分辨率相当高,同步辐射 X 射线光刻是一种非常好的可用于 100nm 以下分辨率的光刻技术^[10],且能在这个波段范围内穿透绝大多数材料。同步辐射 X 射线光刻能得到非常大的光刻线条高宽比,这对满足后步光刻图形的转移及加工的要求非常重要^[11,12]。

3 微波带片数据处理

目前常规集成电路设计工具软件中的图形编辑器较难处理圆弧和任意函数曲线等复杂图形,并且图形生成器所产生的任意一个多边形的顶点数不得超过 200 个点,这样对于制作高分辨率的波带片就形成了一个障碍。实际应用中对于波带片质量的要求极高,如果仅仅制作由 200 个点构成的圆环,那么最终得到的图形就是一个还有很多棱角的图形,失去了圆环的性质和功能,不能满足高分辨率成像的要求。由于制作高分辨率的波带片,特征线条尺寸很小,数据量会很大,如果采用手工通过一个个扇形环面拼接的话,工作量会非常巨大,不好实现而且容易出错,准确度也很难控制。我们通过二次开发的图形生成器宏文件^[13],成功研究了能够自动绘制所需要微波带片版图的程序,对于圆环的处理是根据如下方法进行的。首先将要绘制的每一个圆环分成 n 份,然后再将每一份分成 90 份,这样就用 182 个点表示一个多边形,根据实验要求的精度和条件,选取不同的 n 值,理论上 n 值越大,越逼近圆环,误差就越小;然而如果 n 值过大,多边形的拼接处就会越多,临近效应就越显著,反而带来不好的影响,并且会使数据量剧增,给处理带来很大的麻烦。

我们使用图形生成器自带的圆环生成程序设计了版图,得到的实验结果并不理想,在实验中通过宏

文件将每一个圆环分成 40 份,每一份都用 182 个顶点来表示,最终很好地消除了棱角和“鼓包”的现象^[15],得到很好的实验结果^[14]。“鼓包”是由于电子束系统双曝光造成的^[16]。电子束处理两个相邻的图形时,对于交接处电子束要进行两次曝光,从而造成这些地方曝光剂量过大,形成鼓包。

4 制作流程

具体的制作工艺如图 1 所示。利用低压化学气相沉积(LPCVD)方法,在 900℃ 下将 $\text{SiH}_2\text{Cl}_2/\text{NH}_3$ 的混合气体通入管道中,在硅片两面同时淀积所需要的 2 μm 厚的氮化硅薄膜。将正性抗蚀剂 BP218(北京化学试剂厂)旋涂在硅片的正反两面,使用常规的光刻技术,利用 g-line 光刻机进行曝光,再使用反应离子刻蚀机(reactive ion etch, RIE),利用 SF_6 气体在片子的背面刻出所需要的 SiN_x 窗口,利用化学湿法腐蚀法将背面的体硅去掉,留下自支撑的氮化硅薄膜。利用电子束蒸发设备(Johnsen Ultravac 92EVAP),在片子的正面分别形成 8nm 厚的铬层和 15nm 厚的金层。在硅片的正面旋涂正性抗蚀剂 ZEP 520A(Nippon Zeon Co., LTD.),利用 JEOL JBX 5000LS 电子束曝光机进行直写,再经过电镀、去胶、打底金、漂铬等工艺就得到所要制作微波带片的掩模。然后,利用得到的掩模进行同步辐射 X 射线光刻复制。文中所用实验结果照片都是使用 JEOL 公司生产的 JSM-6401F 型 SEM(scan electron microscopy)得到。

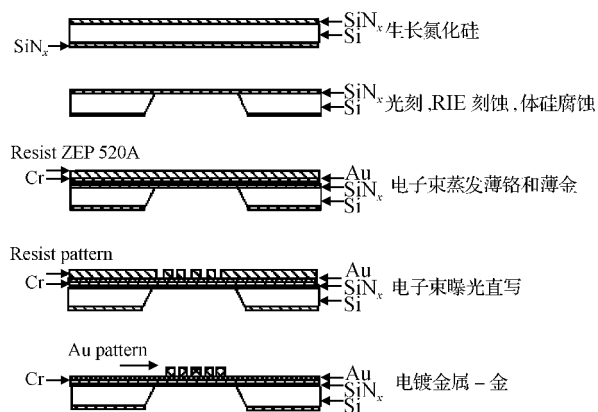


图 1 电子束制作微波带片掩模流程图

Fig. 1 A MZP mask fabrication process using e-beam

5 实验结果

成功地实现了阴阳图形互换技术。首先,利用电子束直写成功制成了阳图形微波带片,然后用同步

辐射 X 射线光刻技术复制成功阴图形(大面积为不透光图形)微波带片.

图 2 是电子束制作的最外环为 150nm, 直径为 $326\mu\text{m}$, 金属高度为 400nm 的微波带片掩模阳图形的 SEM 照片.

的 SEM 照片.

图 3 为在一个 $4\text{mm}\times 4\text{mm}$ 的自支撑氮化硅薄膜上制作的最外环宽度为 150nm, 直径为 $326\mu\text{m}$, 金属高度为 500nm 的 MZP.

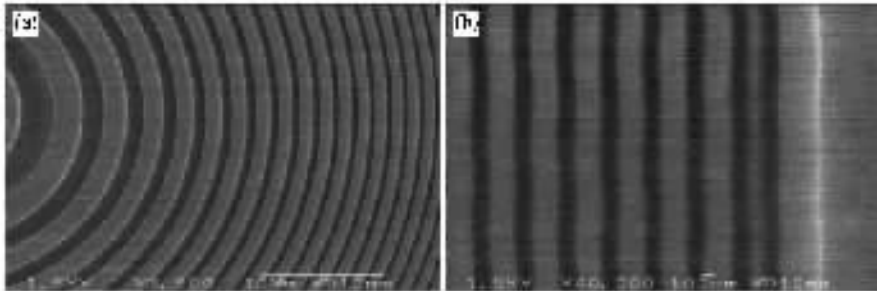


图 2 电子束直写后电镀金的 SEM 图 (a) 电子束直写得到的 MZP 内环; (b) MZP 最外环的局部

Fig.2 SEM images of gold MZP produced by e-beam (a) Inner part of MZP; (b) Outer part of MZP

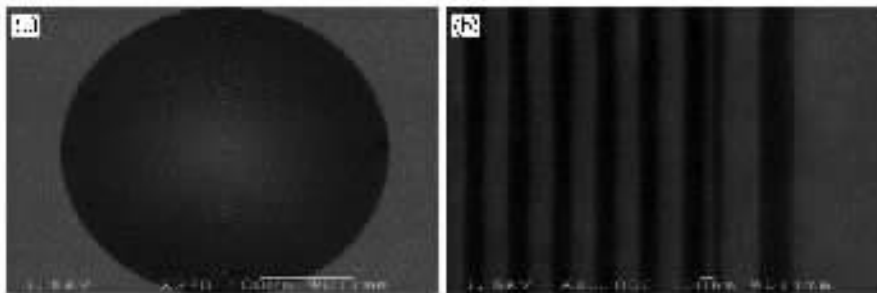


图 3 同步辐射 X 射线光刻复制成功后电镀金的 SEM 图 (a) X 射线光刻复制成功的 MZP 全貌图; (b) MZP 的最外环局部

Fig.3 SEM images of gold MZP replicated by synchrotron radiation X-ray lithography (a) Profile of MZP; (b) Outer width of MZP with 150nm

由于最外环显影液的浓度高, 显影速度快, 这对处于最外面的胶环造成一个向内的压力, 使得最外环展宽, 同时使得最外的胶环宽度减小. 图 2 给出电子束掩模经过电镀之后的效果, 次外环的金属宽度很小, 而最外环的金属宽度则较大, 偏离了实际最外环宽度 150nm 的设计值.

校正方法是: (1) 选择合适的显影时间可以有效控制次外环的宽度, 但外环的展宽是不可避免的; (2) 对最外环进行图形校正. 在电子束曝光之前, 对版图的最外环选择合适的缩放比例.

同步辐射 X 射线光刻复制电镀之后形成图 3 的原因是: 最外环由于外面大面积曝光很快被去掉, 所以最外环的胶减薄并不多. 但是从图 3 看出, 电镀后次外环变得较宽, 这是由于显影时间过长以及次外环中的显影液对于邻近内胶环形成一个向内的压力, 造成其邻近胶环减薄和整体向内移动, 形成了图 3(b) 中次外环的邻近内环金宽度过小和空隙狭小的效果. 总之, 目前认为相较显影时间压力差是主要矛盾. 解决方案是: 图 2 中的现象能够很好消除之后, 合理控制显影时间能够有效消除同步辐射 X 射

线光刻复制出现的这种现象.

6 总结

通过版图自动生成工具, 设计了微波带片, 解决了常用版图工具设计微波带片等复杂图形的限制, 然后利用电子束直写技术和同步辐射 X 射线光刻技术进行微波带片的制作, 并成功地获得可以应用到 ICF 诊断系统的 MZP. 下一步, 将对质量和分辨率更高的位相型微波带片进行设计和制作, 以及开展 MZP 在 ICF 诊断系统中的实际应用测量.

致谢 非常感谢中国科学院微电子研究所陈宝钦老师的指导帮助和韩敬东工程师在提供 SiN_x 薄膜和 SEM 测量方面的帮助. 感谢中国科学院高能物理研究所伊福庭老师在电镀方面提供的帮助和指导.

参考文献

- [1] Hong Yilin, Tian Yangchao, Liu Gang, et al. Study on fabri-

- cation of Fresnel zone plate by LIGA technique. Microfabrication Technology, 1999, 1, 62 (in Chinese) [洪义麟, 田杨超, 刘刚, 等. LIGA 技术制作 Fresnel 波带片的研究. 微细加工技术, 1999, 1, 62]
- [2] Zheng Zhijian, Ding Yongkun, Ding Yaonan, et al. Recent progress and application of diagnostic technique in laser fusion. High Power Laser and Partial Beams, 2003, 15 (11): 1073 (in Chinese) [郑志坚, 丁永坤, 丁耀南, 等. 激光-惯性约束聚变综合诊断系统. 强激光与粒子束, 2003, 15 (11): 1073]
- [3] Jiang Shaoen, Zheng Zhijian, Ding Yongkun, et al. First experiment of pinhole transmission on "Shengguang II" laser facilities. Laser Journal, 2001, 22 (5): 28 (in Chinese) [江少恩, 郑志坚, 丁永坤, 等. "神光 II" 基频激光首次穿孔实验. 激光杂志, 2001, 22 (5): 28]
- [4] Cao Leifeng. Incoherent holography technique and transmission grating spectroscopy. PhD Dissertation, China Academy of Engineering Physics, 2002, Chapter 1: 1 (in Chinese) [曹磊峰. 非相干光全息成像技术透射光栅谱学. 博士论文, 中国工程物理研究院, 2002, Ch1: 1]
- [5] Youn H S, Baik S Y, Chang C H. Hard X-ray microscopy with a 130nm spatial resolution. Review of Scientific Instruments, 2005, 76: 023702-1
- [6] Tamari Y, Azechi H, Fujioka S, et al. Fresnel phase zone plate with ultra fine resolution. Japan-China Workshop Report, 2003
- [7] http://www.nslr.ustc.edu.cn/exp_department/group/1guangxue.html
- [8] Xu Xiangdong, Hong Yilin, Fu Shaojun, et al. X-ray zone plates fabrication and its application. Optical Technology, 1999, 2: 22 (in Chinese) [徐向东, 洪义麟, 付绍军, 等. X 射线波带片的制作及其应用. 光学技术, 1999, 2: 22]
- [9] Tennant D, Spector S, Stein A, et al. Electron beam lithography of Fresnel zone plates using a rectilinear machine and trilayer resists. Proceedings of the Sixth International Conference on X-ray Microscopy, New York, 2000: 601
- [10] Nishi Y, Doering R. Handbook of semiconductor manufacturing technology. New York, Basel: Marcel Dekker, Inc, 2000: 544
- [11] Guo J Z Y, Leonar Q, Cerrina F, et al. Experimental and theoretical study of image bias in X-ray lithography. J Vac Sci Technol B, 1992, 10 (6): 3150
- [12] Smith H I. 100 years of X rays; impact on micro- and nano-fabrication. J Vac Sci Technol B, 1995, 13 (6): 2323
- [13] Hu Yong, Huang Guangyu, Chen Baoqin, et al. Complex micro-litho layout design system. Microfabrication Technology, 2002, 2: 15 (in Chinese) [胡勇, 黄广宇, 陈宝钦, 等. 复杂微光刻图形版图设计系统. 微细加工技术, 2002, 2: 15]
- [14] Wang Deqiang, Kang Xiaohui, Xie Changqing, et al. Study of image datum for high resolution Fresnel zone plates fabricated by e-beam. Microfabrication Technology, 2005, 2: 28 (in Chinese) [王德强, 康晓辉, 谢常青, 等. 电子束制作高分辨率波带片图形数据研究. 微细加工技术, 2005, 2: 28]
- [15] Ozawa A, Taamura T, Ishii T, et al. Application of X-ray mask fabrication technologies to high resolution, large diameter Ta Fresnel zone plates. Microelectronic Engineering, 1997, 35: 525
- [16] Chen Baoqin, Ren Liming, Liu Ming, et al. Proximity effect correction technique in electron-beam direct writing. Chinese Journal of Semiconductors, 2003, 24 (Suppl): 221 (in Chinese) [陈宝钦, 任黎明, 刘明, 等. 电子束直写临近效应校正技术. 半导体学报, 2003, 24 (增刊): 221]

Fabrication of Micro Zone Plates by E-Beam and X-Ray Lithography*

Wang Deqiang^{1,†}, Cao Leifeng², Xie Changqing¹, and Ye Tianchun¹

(1 Laboratory of Micro-Processing and Nano-Technology, Institute of Microelectronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

(2 Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

Abstract: This paper introduces a method for fabricating state-of-the-art micro-zone plates (MZP) on free-standing silicon nitride based on silicon using electron beam lithography and positive resist ZEP 520A. A bright field MZP master mask with an outermost width of 150nm is fabricated with an e-beam machine. In order to get the dark field high aspect ratio and the batch product of the MZP, we replicate the MZP mask by using synchrotron radiation X-ray lithography (XRL). Finally, we successfully replicate an MZP for an ICF diagnostics experiment.

Key words: e-beam; XRL; micro zone plates; Fresnel zone plates

PACC: 4238; 4290

Article ID: 0253-4177(2006)06-1147-04

* Project supported by the Doctoral Innovation Fund of NSRL of the Ministry of Education of China, the National Natural Science Foundation of China (No. 60276019), and the National High Technology Research and Development Program of China (No. 2004AA843082)

† Corresponding author. Email: wangdeqiang@ime.ac.cn

Received 8 September 2005, revised manuscript received 20 December 2005

©2006 Chinese Institute of Electronics