

利用数字光刻系统制作铬掩模的工艺

颜丽华 徐冉冉 龚勇清

(南昌航空大学测试与光电工程学院, 江西 南昌 330063)

摘要 提出一种利用基于数字微反射镜装置(DMD)的数字光刻系统制作掩模版的方法。通过制图软件制作出二元光栅、菲涅耳波带片等衍射光学元件的掩模图,将这些图形导入数字光刻机,利用DMD系统的空间光调制特性,经精缩投影曝光,在覆胶铬板上刻蚀出相应的图案,经过腐蚀及去胶得到需要的掩模版。将制作好的掩模版用于精缩光学系统,可在晶圆上得到亚微米结构的图案,达到高分辨率的要求。该方法是将传统的光刻工艺与DMD数字化虚拟掩模的特点相结合,相对于激光束直写法和粒子束刻蚀法,可以更方便、高效、低成本地获得掩模版。

关键词 衍射光学;数字光刻系统;光栅;掩模版

中图分类号 TN205

OCIS 050.1970 050.2770 220.3740

文献标识码 A

Technology of Making Chromium Mask Using Digital Photolithography System

Yan Lihua Xu Ranran Gong Yongqing

(College of Testing and Photoelectric Engineering, Nanchang Hangkong University,
Nanchang, Jiangxi 330063, China)

Abstract A way to make mask patterns by using digital photolithography system based on digital micro-mirror device(DMD) is proposed. Firstly, a cartographic software is applied to make the mask patterns of diffractive optical elements, which include binary grating, Fresnel zone plate and so on. Then, by importing these patterns to DMD and taking advantage of the spatial light modulation characteristics of DMD, the corresponding patterns on chromium plates are sculptured after the process of highly minified projection exposure. Finally, the required mask patterns are produced after the etching and photo resist stripping of the patterns mentioned above. Applying these prepared mask patterns to reduced optical system, patterns with submicron structure will be produced on silicon wafers, which can fully meet the requirement of high resolution. The method unifies the characteristics of the traditional photoetching craft and the DMD digitization hypothesized mask. Compared with the way of laser beam vertical writing and the particle beam etching, the method is convenient, highly effective, and low cost to obtain mask patterns.

Key words diffraction optics; digital photolithography system; gratings; mask patterns

1 引言

二元光学元件的制作工艺主要分为有掩模套刻技术和无掩模直写技术。最早只能制作二阶相位型衍射光学元件,随着高分辨率掩模版制作技术的发展,掩模套刻的对准精度的提高,这为制作多阶相位二元光学元件提供了可能,并大大提高了衍射效率。当台阶数达到16阶时,衍射效率为98.6%^[1],接近100%,使用这种方法已得到衍射效率达到97%的32台阶菲涅耳透镜^[2,3]。无掩模直写技术是20世纪90年代初开始研究的,通过控制电子束在不同位置处的曝光量,或调制激光束强度,可以刻蚀多阶相位乃至连续分布的表面的表面微浮雕结构,这种方法较适合于制作单件的二元或多阶相位元件或简单的连续轮廓^[4,5]。而采用有掩模套刻更合适于制作复杂轮廓和批量生产。采用有掩模套刻技术制作二元光学元件,则掩模版的质量

收稿日期: 2010-06-02; 收到修改稿日期: 2010-07-09

基金项目: 江西省基金(CA200408071)资助课题。

作者简介: 颜丽华(1985—),女,硕士研究生,主要从事光电检测方面的研究。E-mail: 393005407@qq.com

导师简介: 龚勇清(1965—),男,教授,主要从事光电子技术方面的研究。E-mail: gongyongqing@126.com

成为关键,掩模版上的缺陷是不可接受的,因为它们会被复制到晶圆片上。

目前利用激光束直写及粒子束刻蚀的方法制作复杂的原始掩模版的速度非常缓慢,必须一个图案一个图案地刻蚀,且制作费用相当昂贵:一块用于分辨率为 $1\ \mu\text{m}$ 的 CMOS 工艺的掩模版的价格是 1000 美元;一块用于分辨率为 $0.25\ \mu\text{m}$ 的 CMOS 工艺的掩模版的价格是前者的 6 倍。国产掩模版的价格较国外稍微便宜,根据掩模版的尺寸和图形复杂度价格有不同,一块 4 英寸 ($1\ \text{inch}=25.4\ \text{mm}$) 的中等复杂图形的掩模版的价格约为 1000 元,一块 5 英寸的中等复杂图形的掩模版的价格约为 1500 元。而且,用上述方法制作掩模版,非矩形的形状刻蚀是比较困难的,在集成的光学系统中形成所需要的光滑的曲线也很困难,圆角和任意形状也是非常难绘制的^[6]。本文提出了由数字微反射镜装置(DMD)输出图像直接投影曝光制作掩模版的方法,对任意形状的制作都同样方便、快捷,只要事先将所需要的图案绘制好即可在 DMD 上曝光刻蚀,且一次曝光形成掩模的面积相当于激光束直写系统数小时完成的工作量,大大缩短了衍射微光学器件掩模的制作周期,且制作成本较低。

2 实验原理

2.1 制图原理

实验采用 AUTOCAD 制图软件来制作掩模图,该工具操作起来非常方便,只需掌握基本的制图命令便可绘制任何图形。用它来绘制二元光栅、龙基光栅、达曼光栅、条形波带片、方形波带片以及菲涅耳波带片等衍射光学元件的掩模图是非常方便的。由于实验所用 DMD 的精缩倍数是 14 倍,于是在制图时将掩模图案的尺寸扩大 14 倍,便可在刻蚀后得到需要的图案大小的掩模版。例如,在绘制菲涅耳波带片时,根据外径 $R=2.3\ \text{mm}$,焦距 $f=6.5\ \text{mm}$,波长 $\lambda=1.31\ \mu\text{m}$ 的要求,

$$r_m = \sqrt{2m\lambda f/L}, \quad (1)$$

$$M = R^2 L / (2f\lambda), \quad (2)$$

$$\Delta r_m = \sqrt{\lambda f} / (2\sqrt{m}), \quad (3)$$

式中 L 为台阶数,对于二台阶器件,取 $L=2$,可求出最小环带半径为 $92.3\ \mu\text{m}$,环带数为 155。由于实验所用光刻胶的最小分辨率为 $0.67\ \mu\text{m}$,则可由(3)式计算出 m 约为 47,故在制图时只需画出前 47 级即可。另外,实验用 DMD 芯片有 1024×768 块可偏转的微反射镜,每个镜面的尺寸为 $13.68\ \mu\text{m} \times 13.68\ \mu\text{m}$,故需将掩模图形设置为符合该规格大小的尺寸。

图 1 为包含有二元光栅(左上)、条形和方形波带片(右上)以及菲涅耳波带片(左下和右下)的掩模版图样,图中的十字形为套刻时的对准标记。图 2 为二元光栅的细节图,其周期为 $0.035\ \text{mm}$,经 DMD14 倍精缩后得到二元光栅的周期为 $2.5\ \mu\text{m}$ 。图 3 为条形波带片的掩模图的细节图,这种波带片的特点是在焦点处会聚成一条明亮的直线,其方向与波带片的条带平行。图 4 为方形波带片掩模图的细节图,在绘制的时候将两个条形波带片正交叠加即可得到。这种波带片将使入射平行光会聚成一个明亮的十字线。将其用在激光准直仪中,可以提高准直仪的对准精度。图 5 为菲涅耳波带片掩模图的细节图。

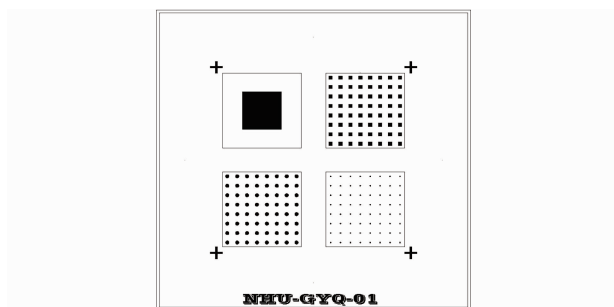


图 1 掩模版图样

Fig. 1 Mask pattern



图 2 二元光栅

Fig. 2 Binary grating

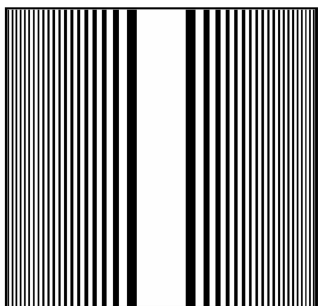


图3 条形波带片

Fig. 3 Bar zone plate

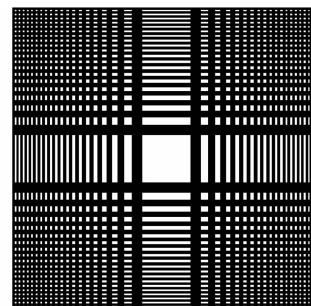


图4 方形波带片

Fig. 4 Square zone plate

2.2 DMD 工作原理

将制作好的掩模图形导入 DMD 芯片,该图形经视频卡以二进制数字形式输出到 DMD 芯片上的 SRAM,再传送到每个微镜下面的 CMOS 存储电路^[7~10]。均匀的平行光束与 DMD 表面法线成 $\pm 20^\circ$ 角入射。当 DMD 正常工作时,每个微镜偏转 $\pm 10^\circ$ 。当反射微镜偏转 $+10^\circ$ 时,反射光束刚好沿垂直方向入射到精缩镜组并成像在涂有光刻胶的铬板上。当反射微镜偏转 -10° 时,反射的光束将不能通过精缩镜。显微镜组用于调焦精确对准观察。图形的灰阶不同,DMD 的每个微镜的偏转频率不同,单位时间内反射光通量也不同,投影精缩后在铬板上各点曝光强度也不相同。由于整张 DMD 掩模被离散化成上百万个像素,每一个像素由精缩光学系统精缩成像为一个亚微米级的光点,每个光点的光强由 DMD 的像素翻转频率决定,可形成 256 级强度调制。因此,DMD 数字化掩模制作系统的曝光量不仅仅由曝光时间控制,还可以通过计算机数字化调整 DMD 像素灰阶控制。DMD 工作原理示意图如图 6 所示。

2.3 投影精缩系统

图 7 为投影式光刻系统实验光路示意图。曝光光源使用波长为 365 nm 的紫外光(UV),采用长工作距离精缩投影物镜,将掩模版上的图案缩影、转印至硅片上。在实验的过程中必须保证光源、掩模版、分束镜以及精缩投影物镜同光轴,且掩模版至分束镜的光程等于分束镜至 CCD 的光程,可用激光束来检测其光程是否相等。将制作好的掩模版应用于精缩系统中,可以在硅片上制作出亚微米结构线宽的图案。例如,将经由 DMD 曝光和刻蚀后得到的关键尺寸为 $3\ \mu\text{m}$ 的非涅耳波带

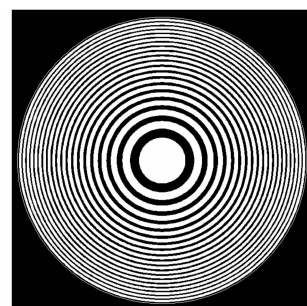


图5 菲涅耳波带片

Fig. 5 Fresnel zone plate

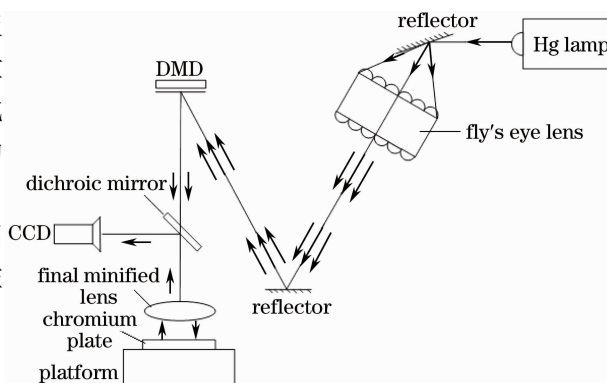


图6 DMD 工作原理示意图

Fig. 6 Schematic diagram of DMD operating principle

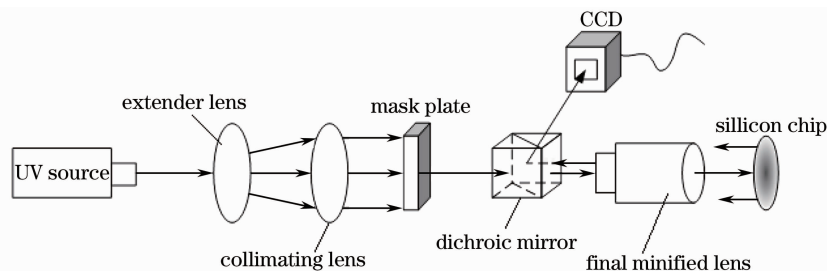


图7 光路示意图

Fig. 7 Schematic diagram of optical path

片应用于该系统中,经过4倍长工作距离精缩投影物镜的缩小后,理论上可以得到的最小线宽为 $0.75\ \mu\text{m}$,但由于误差的存在,最终得到极限尺寸约为 $1\ \mu\text{m}$ 的环形元件。

3 光刻工艺

光刻工艺^[11]过程大致分为以下几个步骤。

第一步:将制作好的掩模图导入DMD,设置好曝光时间,并曝光。本实验设置曝光时间为 $6\sim 20\ \text{s}$,实验使用的铬版为长沙韶光的LRC型版,尺寸为 $2.5\ \text{inch}\times 2.5\ \text{inch}\times 0.06\ \text{inch}$,基板材料是石英玻璃,铬膜表面涂覆的是s1805型正性光致抗蚀剂,曝光光源是波长为 $365\ \text{nm}$ 的近紫外光。

第二步:曝光后烘。曝光时会产生一种驻波现象,故需将曝光后的铬版先放入 $110\ ^\circ\text{C}\sim 120\ ^\circ\text{C}$ 的烘箱中烘 $1\sim 2\ \text{min}$ 来降低或消除驻波效应,然后在 $23\ ^\circ\text{C}$ 的温度下冷却 $40\ \text{s}$ 。

第三步:显影与定影。本实验配置了质量分数为 0.35% 的氢氧化钠水溶液作为显影剂,用清水作为定影剂。将冷却后的铬版放入显影液中显影 $15\sim 20\ \text{s}$,然后放入清水中定影片刻。由于温度对显影效果影响很大,实验中使用水浴恒温箱来保持温度稳定在 $21\ ^\circ\text{C}$ 左右。显影时,铬板在显影液中要匀速摆动,以避免溶解的光刻胶残留在铬版表面。

第四步:坚膜。显影过后必须再经过一次烘烤,实验选择在 $120\ ^\circ\text{C}$ 的温度下烘烤 $60\ \text{s}$ 。

第五步:铬刻蚀。本实验采用的是湿法刻蚀,使用的脱膜液是将 $200\ \text{g}$ 的硝酸铈铵与 $35\ \text{mL}$ 的醋酸混合,并加去离子水至 $1000\ \text{mL}$ 配置而成。铬版坚膜完毕后,将其放入 $21\ ^\circ\text{C}$ 的脱膜液中匀速摆动 $35\sim 40\ \text{s}$,随后用清水冲洗。

第六步:光刻胶剥离。该过程就是将经过刻蚀的铬板表面残留的光刻胶去除干净。本实验采用的去胶液是质量分数为 5% 的氢氧化钠溶液,将铬版浸在该溶液中 $40\ \text{s}$ 即可去除表面残余的光刻胶。

4 实验结果及分析

经过大量实验表明,曝光时间设置为 $19\ \text{s}$,显影时间为 $15\ \text{s}$,刻蚀时间为 $38\ \text{s}$ 时的效果最佳。图8为二元光栅铬掩模,图9为菲涅耳波带片铬掩模。



图8 二元光栅掩模

Fig. 8 Binary grating mask

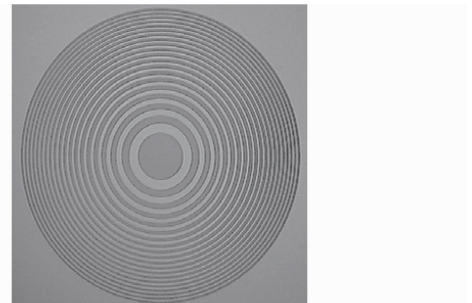


图9 菲涅耳掩模

Fig. 9 Fresnel mask

实验对最终掩模版质量的影响主要来自实验系统本身限制,图形平滑度的误差及曝光后续处理工艺等这几个方面。实验系统本身的限制包括DMD带来的误差和光路系统的误差等,后续处理误差包括显影定影、蚀刻及去胶等方面。对于实验系统本身的限制,其改善空间相对较窄,而掩模图形的质量在制图完成后可以用Photoshop对图形进行修补,所以应当从曝光后续工艺参数方面着手来完善制作工艺,其中曝光、显影定影时间及蚀刻的误差起主要作用。

1)曝光时间误差随着曝光时间的连续、镜头吸热而产生的镜头畸变等因素的影响,会使物镜的倍率产生变化直接影响到线宽的变化而产生的误差。这种变化是时间的函数,并不产生瞬间的变化。这种影响将产生同一线宽不同的宽度误差。

2)显影定影误差主要是显影后,光刻胶均匀曝光的那部分区域的表面浮雕高度是光刻胶曝光时间和显影时间的函数。由于许多光刻胶即使是未曝光部分,其膜层的厚度在显影时也会有少量的减少,故浮雕的最

终高度应为初始厚度减去显影期间去掉的厚度。而显影时所产生的刻蚀深度误差因素主要有显影液浓度和显影时间。当显影时间不变时,如果显影液浓度偏高,则刻蚀深度增大;当显影液浓度不变时,如果显影时间加长,则刻蚀深度也会增大。显影温度也会对显影的质量造成影响,温度过高,光刻胶溶解速度太快,会影响图形精度;温度过低,反应太慢,显影时间将变长,会引起胶膜的溶胀和图形边缘的渗透腐蚀,甚至出现浮胶。可以通过增加曝光量来加快显影速率,但曝光时间过长也会产生曝光误差,故精确控制曝光时间和显影时间很重要。还应注意,显影液应该经常更换。

3) 蚀刻误差,大多数湿化学蚀刻是各向同性的,在各个方向上等量地去掉材料,这会引入掩模底切和线宽变窄。

4) 另外,光刻胶的非线性敏感误差,外界环境因素如空气清洁程度、实验环境的潮湿度、曝光平台的振动等对掩模版的制作都有一定程度上的影响。

5 结 论

通过大量的实验得出了制作衍射光学元件掩模版的工艺参数,分析了实验过程中产生误差的一些因素,通过投影精缩系统的4倍精缩,最终制作出了最小线宽约为 $1\ \mu\text{m}$ 的环形及 $0.67\ \mu\text{m}$ 的直线元件。由于湿法刻蚀很少是完美的各向同性的,刻蚀出的形貌往往会在双侧壁有或深或浅的倾斜,且环形在刻蚀时比直线困难,所以制作出的环形元件和直线元件在最小线宽上存在差别。

参 考 文 献

- H. P. Hull Qi Ke. Micro-optics Elements, System and Applications[M]. Zhou Haixian Transl. Beijing: National Defense Industry Press, 2002. 62~202
H. P. 赫尔齐克. 微光学元件、系统和应用[M]. 周海宪译. 北京: 国防工业出版社, 2002. 67~202
- Li Pinggui, Gong Yongqing, He Xingdao *et al.*. Research on the method of micro-optical elements mask fabricated by lithography technology[J]. *Science and Technology of West China*, 2008, **7**(6): 10~12
李平贵, 龚勇清, 何兴道 等. 微光学元件芯模的光刻工艺研究[J]. 中国西部科技, 2008, **7**(6): 10~12
- Gong Yongqing, Liu Zhihui, Gao Yiqing *et al.*. Process design for micro core mould of binary optical element[J]. *J. Appl. Opt.*, 2009, **30**(2): 304~308
龚勇清, 刘智怀, 高益庆 等. 一种二元光学元件阵列微芯模的工艺设计研究[J]. 应用光学, 2009, **30**(2): 304~308
- Jin Guofan, Yan Yingbai, Wu Minxian *et al.*. Binary Optical[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1998. 100~208
金国藩, 严瑛白, 邬敏贤 等. 二元光学[M]. 北京: 国防工业出版社, 1998. 100~208
- E. B. Kley, F. Thoma. Fabrication of micro-optical surface profiles by using gray scale masks[C]. *SPIE*, 1998, **3276**: 254~262
- Sami Franssila. Introduction to Microfabrication[M]. Chen Di Transl., Beijing: Electronics Industry Press, 2006. 100~238
弗兰西拉. 微加工导论[M]. 陈迪译. 北京: 电子工业出版社, 2006. 100~238
- Guo Xiaowei, Du Jinglei, Liu Yongzhi. Improving the profiles of imaging patterns by optimizing mask in DMD-based maskless photolithography[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(3): 794~798
郭小伟, 杜惊雷, 刘永志. 优化掩模分布改善数字光刻图形轮廓[J]. 光学学报, 2009, **29**(3): 794~798
- Duan Qian. Method and Simulation of Micro Optical Elements Fabricated by Digital Lithography Technology[D]. Chendu: Sichuan University, 2006. 2~69
段茜. 数字光刻及其制作微光学元件的模拟研究[D]. 成都: 四川大学, 2006. 2~69
- Guo Xiaowei, Du Jinglei, Luo Boliang *et al.*. Imaging model for DMD-based gray-tone lithography system[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(9): 1412~1415
郭小伟, 杜惊雷, 罗铂亮 等. 基于数字微反射镜灰度光刻的成像模型[J]. 光子学报, 2006, **35**(9): 1412~1415
- Lu Jinhong, Xie Xiangsheng, Zhang Peiqing *et al.*. Submicron-sized optical fabrication with DMD based lithography[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(4): 600~603
陆锦洪, 谢向生, 张培晴 等. 基于数字微镜器件亚微米制备技术研究[J]. 光子学报, 2010, **39**(4): 600~603
- Ye Hong, Wu Huilong. Key factors analysis of photomask process[J]. *Research and Progress of SSE Solid State Electronics*, 2009, **29**(4): 606~608
叶红, 吴会龙. 掩模版制作工艺中典型问题探析[J]. 固体电子学研究与进展, 2009, **29**(4): 606~608