

文章编号: 1001-3806(2004)04-0406-04

灰度掩模制作系统掩模图形的生成及工艺研究

杨智, 戴一帆, 颜树华

(国防科技大学 机电工程与自动化学院, 长沙 410073)

摘要: 灰度掩模法是目前正在积极探索的一种二元光学器件制作方法。从基于空间光调制器的灰度掩模制作方法出发,就“掩模图形的生成”和“工艺”这两个难点问题进行了深入的研究,并具体地制作了几种常用的二元光学器件的灰度掩模,为该方法进一步投入实用提供了一条较好的思路。

关键词: 空间光调制器;灰度掩模;工艺;二元光学

中图分类号: TN305.7 文献标识码: A

Manufacturing system for gray-scale masks' mask patterns' making and technique study

YANG Zhi, DAI Yifan, YAN Shu-hua

(College of Mecharonics Engineering and Automation, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: Gray scale mask method is an active groping facture idea of binary optics at present. For more utility, some difficult questions such as mask patterns' making and technique are being studied in depth based on the manufacturing method for gray scale masks using special light modulator. At the same time, some gray-scale masks of nomal binary optical elements have been actually fabricated.

Key words: spatial light modulator; gray scale mask; manufacture technics; binary optics

引言

灰度掩模法是目前正在积极探索的一种二元光学器件制作方法^[1]。通过在掩模平面内不同位置提供不同的透过率,单一的灰度掩模便含有了一组二元掩模的全部信息,在经过一次光刻后,就可得到所需要的台阶或连续变化的浮雕轮廓,该方法只经一次图形转印,与通过多次套刻和图形转印的传统二元光学器件制作方法相比,无对准误差、周期短、方法简单;与新兴的激光束直写或电子束直写方法相比,则具有成本低的优点。虽然其加工精度有待提高,但总的说来,这是一种较有前途的制作方法。

灰度掩模根据制作设备及原理可分为直写灰度掩模和模拟灰度掩模。作者重点研究的是基于空间光调制器的灰度掩模制作方法。

直写灰度掩模是指用激光直写设备或电子束直

写设备制作的灰度掩模^[2]。模拟灰度掩模则是通过改变二元掩模透过部分的数目和面积,利用不同的二元掩模编码方案,通过投影光刻系统进行空间滤波形成的灰度掩模,有两种滤波方法,一是对带有方孔的网板光掩模进行空间滤波^[3],另一种是对特殊的浓淡点图进行空间滤波^[4]。就直写灰度掩模而言,精度较高,但与利用直写设备制作二元光学器件一样,所需设备十分昂贵,且制作灰度掩模的速度慢、成本高。就模拟灰度掩模而言,可建立在传统光刻工艺、常规设备及材料的基础上,比较简单实用,但网板和浓淡点图的空间频率限制了最小特征尺寸的进一步缩小。

与上面这两种灰度掩模制作方法相比,基于空间光调制器的灰度掩模制作方法采用了逐个图形曝光的方式,可克服直写灰度掩模速度慢、成本高的缺点;利用空间光调制器的高分辨率、高灰阶数和高对比度,则可使掩模的最小特征尺寸达到微米级,所以,在灰度掩模制作上具有较好的应用前景^[5]。

1 基于空间光调制器的灰度掩模制作系统

图1即为“基于空间光调制器的灰度掩模制作

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50005022)

作者简介:杨智(1978),男,博士研究生,现主要从事微光机电方面的研究。

E-mail: sun8_1@163.com

收稿日期:2003-08-19;收到修改稿日期:2004-01-07

系统”的原理图。

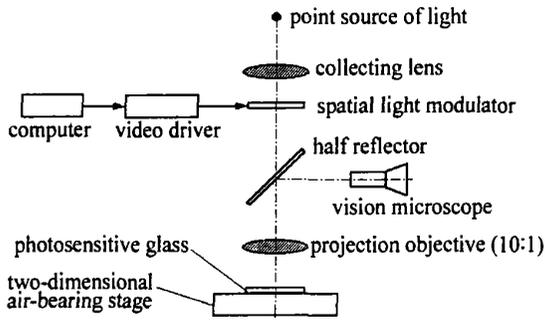


Fig. 1 The manufacturing system for gray scale masks based on spatial light modulator

点光源发出的光束经聚光透镜后成为平行光,垂直照在采用电寻址方式的透射型空间光调制器上。空间光调制器通过视频驱动器同计算机相连,并由计算机控制和输入视频信号;空间光调制器对入射光束进行强度调制,从而便可产生高质量的灰阶图像。该灰阶图像经过精缩投影物镜成像在放置于由超精密扭轮摩擦传动系统驱动、激光干涉仪精确定位的高精度的二维工作台上的感光玻璃上,通过移动二维工作台,并由计算机控制切换空间光调制器上的显示图像,以拼接的方式对整块感光玻璃进行曝光。再经显影、定影后可得到一张灰阶底片,该底片就是所要得到的灰度掩模。

在这种灰度掩模制作方法中,灰度掩模图形的生成、工艺是其中的难点也是重点问题,作者即是针对这两个问题做了一些研究。

2 灰度掩模图形的生成

灰度掩模图形生成的实质就是控制灰度掩模上不同位置的透过率。透过率是由所需要设计的二元光学器件决定的。所以,当二元光学器件设计完成,从理论上说,也就得到了灰度掩模上不同位置的透过率。然而,从所设计的二元光学器件到实际上在灰度掩模上所形成的透过率还要经历 1 个过程:即怎样将灰度掩模上所形成的透过率与所需要的二元光学器件不同位置的刻蚀深度一一对应。因为一般是先在光刻胶上形成浮雕轮廓,再经反应离子束刻蚀或其它刻蚀方法将此浮雕轮廓转移到基片上,所以也可以说是怎样将灰度掩模上所形成的透过率与光刻胶上浮雕轮廓不同位置的深度一一对应。

浮雕轮廓不同位置的深度是由光刻胶的感光度决定的,而感光度则与很多的因素有关,如光刻胶的性质、涂膜厚度、烘膜温度及时间、曝光强度、光源波长范围等,当选定了一种光刻胶,假定涂膜厚度相

同,因烘膜温度及时间、光源波长范围相同,感光度就主要依赖于曝光强度了。

图 2 示出实验中当选定 KTRF 光刻胶时曝光强度对此光刻胶感光度的影响。

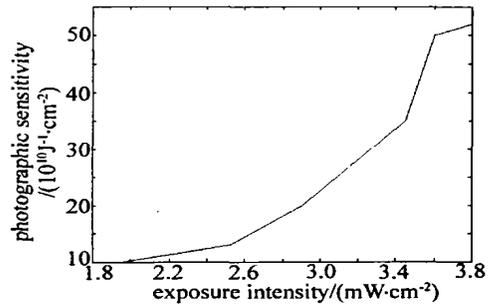


Fig. 2 Exposure intensity's effect about KTRF photographic sensitivity

由图可知,当曝光强度达到某一数值后,曝光强度基本上与感光度成线性关系;因感光度与光刻胶剥离的厚度也成线性关系,故曝光强度在达到某一数值后与光刻胶剥离厚度成线性关系。而曝光强度与透过率一一对应,同样地便可以得到透过率与光刻胶剥离厚度成线性关系。假设在点 (x, y) 处,透过率为 $t(x, y)$,剥离厚度为 $h(x, y)$,则可得: $t(x, y) = k \cdot h(x, y)$ 。又因 $0 < t(x, y) < 1$,所以,可设: $k = 1/h_{\max}$ 。式中, h_{\max} 为光刻胶涂膜厚度,故 $t(x, y) = h(x, y)/h_{\max}$ 。因为此式得来的前提是“曝光强度达到某一数值”,所以还要进行修正:

$$t(x, y) = t_0 + h(x, y)/h_{\max} \quad (1)$$

式中, t_0 的作用便是为了越过前面的非线性区,也即先在 t_0 的作用下进行均匀曝光。在透过率与光刻胶厚度成线性关系后,也就可以直接用上式中的 $t(x, y)$ 来编制掩模板图形了。又因为剥离的厚度为离散值,所以,相应的透过率也应为离散值。当制作台阶式的二元光学器件时,这是没有问题的,而当制作连续浮雕轮廓的二元光学器件时,则还需要经历一离散化的过程,也即采样过程。

假设连续二维的透过率函数 $t(x, y)$ 为带限函数(即 $t(x, y)$ 的傅里叶变换在 $[-w_x, +w_x], [-w_y, +w_y]$ 外为0),要得到 $t(x, y)$ 的采样,必须用一系列单位间隔的采样函数 $s(x, y)$ 与之相乘,设:

$$s(x, y) = \sum_{i=-\infty}^{+\infty} \sum_{j=-\infty}^{+\infty} \delta(x - i\Delta x, y - j\Delta y) \quad (2)$$

式中, $\Delta x, \Delta y$ 为 x 和 y 方向的单位采样间隔。则采样后的透过率函数可表示为:

$$t_a(x, y) = t(x, y)s(x, y) \quad (3)$$

其频谱为:

$$F(u, v) = F\{t(x, y)\} \times F\{s(x, y)\} = \frac{1}{\Delta x \Delta y} \sum_{i=-\infty}^{+\infty} \sum_{j=-\infty}^{+\infty} F\left[u - i \frac{1}{\Delta x}, v - j \frac{1}{\Delta y}\right] \quad (4)$$

由二维采样定理, 当: $1/\Delta x \geq 2w_x$; $1/\Delta y \geq 2w_y$ 时, 采样后频谱不重叠, 即采样后图像不失真^[6]。

当有了离散化的透过率后, 灰度掩模图形也可以顺利地生成了。

3 工 艺

跟普通的照相一样, 包括 6 部分: 曝光、显影、停影、定影、水洗、干燥^[7], 其中曝光、显影、定影是其关键, 下面将针对此灰度掩模法的特点, 从这 3 个方面分别加以说明。

3.1 曝 光

为了使灰度掩模图形即各点的透过率在曝光时得到充分的反应, 首先要有一调焦过程: 先将与感光玻璃等厚的半反半透镜放置于装夹感光玻璃的同一位置, 调整二维工作平台, 使得半反半透镜正处于光源的正下方, 然后一边上下移动精缩投影物镜, 一边从由分光镜和显微镜组成的监测系统中观察, 当像所在焦平面与感光层完全重合(即从半反半透镜正反两面均能看到清晰图像)时, 调焦便告成功。

感光材料受到点光源的照射, 假设照度为 E , 曝光时间为 t , 则曝光量 H 可表示为: $H = E \cdot t$ 。在一般情况下, 感光材料的致黑度(也就是灰度)取决于曝光量的大小。只要照度和曝光的时间乘积相同, 也就是曝光量相同, 感光材料上形成的影像密度就会相同, 这种关系称为互易律成立; 但当照度极大或是极小时, 虽然曝光量相同, 影像密度还取决于照度和曝光时间的具体数值, 这种关系称为互易律失效。为了避免互易律失效的情况, 也是简单起见, 针对此感光材料, 实验中选用了谱线为 589.6nm 的高压钠灯, 此时, 曝光量就完全由曝光时间决定了。

曝光时间由一机械式快门控制, 但具体曝光时间的选定是比较麻烦的, 只能一步步地实验, 当在某一曝光时间内能达到最好的效果时, 此一曝光时间便可确定为最佳的曝光时间, 以后的实验便可在这一曝光时间进行。

3.2 显 影

显影的方法有两种: 物理显影法、化学显影法。就物理显影法而言, 因显影液的性能很不稳定, 显影技术难以掌握, 所以实验中采用的是化学显影法。

显影过程是将感光材料浸泡在显影液中完成

的。显影液由 4 部分组成: 显影剂、促进剂、保护剂和抑制剂。可以自己配, 也可以购厂方的成品。显影剂的作用是将曝过光的卤化银还原, 所以, 它的首要要求便是能将曝过光的卤化银与没曝光的卤化银区分开, 其次就要考虑还原的速度, 也就是显影的时间, 一般来说几分钟是较好的, 此外, 最好能满足颗粒小、灰雾小、化学稳定性好、保存性好、无毒等条件。促进剂的目的是通过改变显影液的 pH 值来提高显影的速度。因显影剂在水溶液中容易被氧化, 而氧化后就不能起到显影的作用, 为了防止这一点, 需要加入保护剂。抑制剂的作用是为了防止未曝光部位的感光材料也产生致黑现象, 一般选用溴化钾。

当这几种成分都准备好之后, 就可以根据配方来配显影液了, 并不是每一种配方都一样, 要根据不同的感光材料来拟定配方。这里要注意添加的顺序, 一般按以下步骤进行: 水 \rightarrow 添加保护剂 \rightarrow 添加显影剂 \rightarrow 添加促进剂 \rightarrow 添加抑制剂。

显影液配好之后, 注意放进棕色瓶中避光密闭保存, 以免被氧化造成显影能力衰退。另外, 随着多次显影的进行, 浓度会有所降低, 后面显影的时候要再添加适量的显影剂, 以保证显影的效果。

3.3 定 影

定影的目的是将未曝光的卤化银溶解。因此, 必须具有以下条件: 不溶解还原后的金属银; 能与卤化银中的某一离子生成稳定的易溶于水的化合物, 并且这种化合物的电离程度要比卤化银的电离程度要小。通常的定影液由 4 部分组成: 定影剂、坚膜剂、保护剂、酸。定影剂的作用是与乳胶层上的卤化银反应, 生成溶于水的稳定化合物, 一般选用 $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ 。坚膜剂是为了增强乳胶层的机械强度, 防止定影、水洗中脱落。加酸的目的是为了定影液保持酸性, 一方面中和显影中带来的碱, 迅速控制显影; 另一方面使介质保持合适的 pH 值, 使坚膜剂发挥最大的坚膜作用。保护剂的作用是防止定影剂 $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ 的分解。

同显影一样, 也要注意添加的顺序: 水 \rightarrow 添加定影剂 \rightarrow 添加保护剂 \rightarrow 添加酸 \rightarrow 添加坚膜剂。定影液配好后, 也要避光密闭保存。

4 实验结果

充分考虑以上因素后, 制作了几种较为常用的二元光学器件的灰度掩模, 如图 3 所示。其中图 3a、图 3c、图 3e 表示的二元光学灰度掩模是由两个灰度级别组成的, 也即二元掩模; 图 3b、图 3d、图 3f 表示

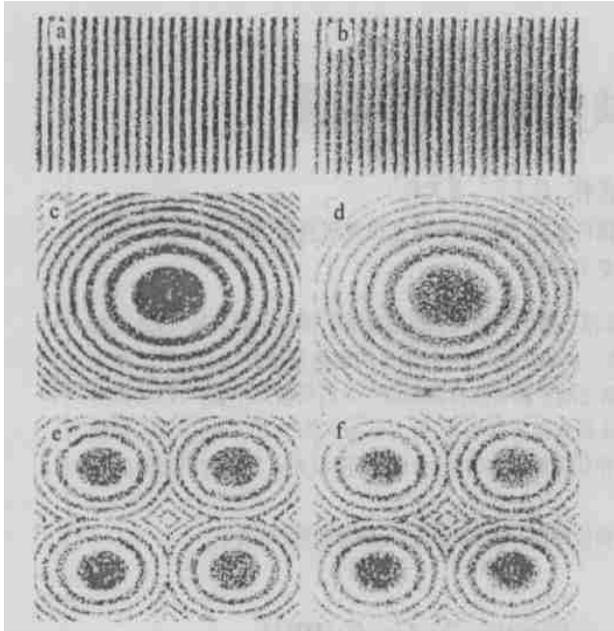


Fig. 3 Gray scale masks of some binary optical elements
 a—two levels mask of blazed grating b—eight levels mask of blazed grating
 c—two levels mask of Fresnel lens d—eight levels mask of Fresnel lens
 e—two levels mask of 2×2 Fresnel lens array f—eight levels mask of 2×2 Fresnel lens array

的二元光学灰度掩模是 8 个灰度级别的。灰度级别越高,器件的衍射效率也越高,但相应的制作难度也加大;因为二元掩模便于利用常规的大规模集

成电路技术进行加工,故开始所制作的二元光学器件一般都是两个台阶的,如达曼光栅等。

5 结束语

基于空间光调制器的灰度掩模制作方法在整个的灰度掩模法中是一个较新的方法,研究的空间还很大,比如说将其同激光直写联系起来,就具有不少的吸引力。随着这一方法的进一步推广,相信其会具有更加宽广的应用前景。

参 考 文 献

- [1] 金国藩,严瑛白,邬敏贤 *et al.* 二元光学 [M]. 北京:国防工业出版社,1998.298~335.
- [2] MICHAEL R W, SU H. Laser direct write gray level mask and one step etching for diffractive microlens fabrication [J]. *Appl Opt*, 1998, 37 (32): 7568~7576.
- [3] REIMER K, QUENZER H J. Micro optic fabrication using one level gray tone lithography [J]. *SPIE*, 1997, 3008: 279~288.
- [4] DONALD C O, WILHE S R. Gray scale masks for diffractive optics fabrication: II Spatially filtered half one screens [J]. *Appl Opt*, 1995, 34(32): 7518~7526.
- [5] 颜树华,戴一帆,吕海宝 *et al.* 基于空间光调制器的灰度掩模制作系统 [J]. *中国激光*, 2004, 31(1): 45~47.
- [6] 章毓晋. 图像工程(上册)——图像处理和分析 [M]. 北京:清华大学出版社,1999.43~50.
- [7] 吴若薇. 制版感光材料 [M]. 北京:印刷工业出版社,1989.179~217,235~242.
- [4] TACCHIO S, LAPORTA P, LONGHI S *et al.* Diode pumped bulk erbium yttrium lasers [J]. *Appl Phys*, 1996, B63: 425~436.
- [5] TANGUY E, LARAT C, POCHOLLE J P. Modelling of the erbium yttrium laser [J]. *Opt Commun*, 1998, 153: 172~183.
- [6] PASQUALE F D. Modeling of highly efficient grating feedback and Fabry Perot Er^{3+} - Yb^{3+} co doped fiber laser [J]. *IEEE J Q E*, 1996, 32(2): 326~332.
- [7] SHOOSHARI A, MESHKINFAM P, TOUAM T *et al.* Ion-exchanged Er/Yb phosphate glass waveguide amplifiers and lasers [J]. *Opt Engng*, 1998, 37(4): 1188~1192.
- [8] KARÜSEK M. Optimum design of Er^{3+} - Yb^{3+} co doped fibers for large signal high pump power applications [J]. *IEEE J Q E*, 1997, 33(10): 1699~1705.
- [9] ACHTENHAGEN M, BEESON R J, PAN F *et al.* Gain and noise in yttrium sensitized erbium doped fiber amplifiers: measurements and simulations [J]. *IEEE J Lightwave Technol*, 2001, 19(10): 1521~1526.
- [10] PEDERSEN B, BJAKLEV A. The design of erbium doped fiber amplifiers [J]. *IEEE J Lightwave Technol*, 1991, 9(9): 1105~1112.
- [11] GILES C R, DESIRVIRE E. Modeling erbium doped fiber amplifiers [J]. *IEEE J Lightwave Technol*, 1991, 9(2): 271~283.

参 考 文 献

- [1] DOMINIC V, MacCORMACK S, WAARTS R *et al.* 110W fibre laser [J]. *Electron Lett*, 1999, 35(14): 1158~1160.
- [2] FEDERIGHI M, PASQUALE F D. The effect of pair induced energy transfer on the performance of silica waveguide amplifiers with high Er^{3+} / Yb^{3+} concentrations [J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 1995, 7(3): 303~305.
- [3] MINELLY J D, BARNE W L, LAMING R I *et al.* Diode array pumping of Er^{3+} / Yb^{3+} co doped fiber lasers and amplifiers [J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 1993, 5(3): 303~310.

(上接第 382 页)

的径向分布并不是均匀分布,越接近于纤芯中心处,上能级粒子数越低,越接近于纤芯边缘,上能级粒子数越高;(2) Er^{3+} 上能级粒子数沿光纤长度分布有一个由低到高,再由高到低的过程;(3) 在 Er^{3+} 上能级粒子数达到峰值点处,信号光放大的斜率值最大;(4) 正向泵浦条件与反向泵浦条件下, Er^{3+} 上能级粒子数沿光纤的分布并不相同。