

文章编号: 0258-7025(2004)01-0045-03

# 基于空间光调制器的灰度掩模制作系统

颜树华, 戴一帆, 吕海宝, 李圣怡

(国防科技大学机电工程与自动化学院, 湖南 长沙 410073)

**摘要** 提出了基于空间光调制器的灰度掩模制作新方法。分析了该方法的基本原理,构造了相应的实验系统。同时制作了闪耀光栅、菲涅耳透镜以及 Dammann 光栅等二元光学器件的灰度掩模。该方法采用逐个图形曝光的方式使其具有内在的并行特性,可大大提高灰度掩模的制作速度和精度,并降低生产成本。

**关键词** 光电子学;灰度掩模;空间光调制器;二元光学

中图分类号 TN 305.7 文献标识码 A

## Manufacturing System for Gray-scale Masks Based on the Spatial Light Modulator

YAN Shu-hua, DAI Yi-fan, LÜ Hai-bao, LI Sheng-yi

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

**Abstract** The novel manufacturing method for gray-scale masks based on the spatial light modulator has been proposed. In this paper, the basic principle of this method was analyzed, and the corresponding experimental system was fabricated. At the same time, the gray-scale masks of some binary optical elements such as blazed grating, Fresnel lens and Dammann grating have been actually fabricated. This system has intrinsic parallel characteristic owing to its stepper exposure mode, therefore it can improve the manufacturing speed and precision of gray-scale masks with low cost.

**Key words** optoelectronics; gray-scale mask; spatial light modulator; binary optics

### 1 引言

灰度掩模法<sup>[1~3]</sup>是一种新的二元光学器件制作方法(见图1),在掩模平面内不同位置处提供可变的透过率,单一灰度掩模含有一组二元掩模的全部信息,在经过一次光刻过程后得到所需要的多台阶或连续变化的浮雕轮廓。该方法成本较低,无对准误差,其关键是难以快速地制作一张高精度的带不同灰度等级的掩模版,以精确控制曝光量。

目前灰度掩模根据制作设备及原理的不同可分为直写灰度掩模和模拟灰度掩模<sup>[4]</sup>两大类。

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。美国迈阿密大学的 R.

W. Michael 和 Heng Su<sup>[5]</sup>利用激光直写设备在高性能离子束轰击敏感玻璃 HEBSG(high energy beam sensitive glass)上制作灰度掩模。直写灰度掩模的设备十分昂贵,且制作灰度掩模的速度慢、成本高。

模拟灰度掩模是通过改变二元掩模透过部分的数目或面积,利用不同的二元编码方案,通过投影光刻系统进行空间滤波形成准灰度掩模。德国夫琅和费硅技术研究所的 K. Reimer 等<sup>[6]</sup>在常规光学曝光装置中使用网板光掩模,调节网孔的大小、调制光强度的变化,产生所需模拟灰度图形;美国佐治亚工业技术研究所的 C. O. Donald 和 S. R. Willie<sup>[7]</sup>使用简单的成像系统,在精缩过程中对特殊的浓淡点

收稿日期:2002-08-09;收到修改稿日期:2002-11-18

基金项目:国家自然科学基金(编号:50005022)资助项目。

作者简介:颜树华(1969.12—),男,湖南邵东人,副教授,硕士,主要从事二元光学、光电检测技术研究。E-mail:

图进行空间滤波,产生模拟灰度图形。模拟灰度掩模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。

本文提出的基于空间光调制器的灰度掩模制作方法,采用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,可使掩模的最小特征尺寸达到微米级。

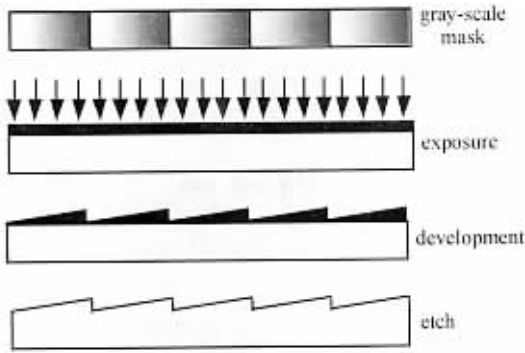


图 1 二元光学器件灰度掩模法的制作原理

Fig. 1 Principle of manufacturing binary optical elements using gray-scale mask method

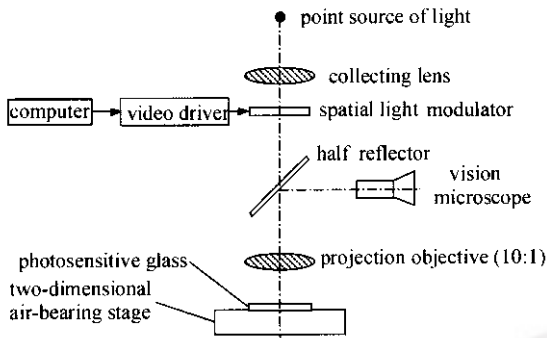


图 2 基于空间光调制器的灰度掩模制作系统

Fig. 2 Manufacturing system for gray-scale masks based on spatial light modulator

## 2 基本原理

图 2 为灰度掩模制作系统原理图。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。点光源发出的光束经聚光透镜后成为平行光,垂直照射采用电寻址方式的透射型空间光调制器,并由空间光调制器对入射光束进行强度调制,从而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感光玻璃上,对感光材料曝光。感光玻璃置于二维气浮平台上,高精度的二维工作台由超精密齿轮摩擦传动系统驱动、激光干涉

仪精确定位。半反半透镜和显微镜组成的观察系统可监测像所在焦平面是否与感光层完全重合。

曝光时每次只能对一小块面积的感光材料进行曝光,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。

## 3 实验系统

实际系统中,光源采用超高压球形短弧氙灯,其发光体的面积仅为  $0.25 \text{ mm} \times 0.5 \text{ mm}$ ,且光谱能量分布不随工作电流和工作时间的变化而变化,是一种比较理想的稳定点光源。可在光路中加上滤光片,使照明光成为准单色光,以降低对精缩物镜的选择要求。空间光调制器选择 SVGA (super video graphics array),该调制器采用扭曲向列相模式的液晶材料,并由多晶硅薄膜晶体管驱动,可获得较好的温度稳定性和快速响应特性。其空间分辨率为  $800 \times 600$  个像素,单个像素大小为  $33 \mu\text{m} \times 33 \mu\text{m}$ ,可显示的灰阶数达 256,轴向对比度超过  $150:1$ ,且体积小、重量轻,利于集成。精缩投影物镜选择 Nikkor 优质照相镜头,焦距为  $50 \text{ mm}$ , $F$  数为 1.4,等效数值孔径  $\text{NA} = 0.37$ ,理论分辨率为  $1308 \text{ l/mm}$  (波长  $\lambda = 0.546 \mu\text{m}$ )。选择投影光学系统的精缩倍率为  $10:1$ ,则单次曝光面积为  $2.64 \text{ mm} \times 1.98 \text{ mm}$ 。二维精密平台工作范围为  $150 \text{ mm} \times 150 \text{ mm}$ ,定位精度和拼接精度各为  $0.5 \mu\text{m}$ 。感光材料采用超微粒干版。

## 4 实验结果

图 3 是利用该灰度掩模制作系统得到的初步实验结果,所给出的灰度图形为一次曝光所得到的面积。图 3(a), (b) 的大小为  $2.64 \text{ mm} \times 1.98 \text{ mm}$ ,图 3(c), (d), (e), (f), (g) 的大小为  $1.98 \text{ mm} \times 1.98 \text{ mm}$ 。图 3(a), (c), (e), (g) 中的二元光学器件掩模由 2 个灰度级别组成,即这些掩模相当于二元掩模。图 3(b), (d), (f) 中的二元光学器件掩模由 8 个灰度级别组成,也就是说空间光调制器上显示的原始图像是 8 个灰级的。其中,菲涅耳透镜及其阵列的 8 阶灰度掩模的最小特征尺寸最小,为  $6.6 \mu\text{m}$ 。由于两个台阶的二元光学器件便于利用常规的大规模集成电路技术进行加工,所以较早时提出的 Dammann 型阵列分束器是一种二值相位型器件,自

然其掩模亦为二元掩模。图 3(g) 中的 Dammann 光栅的分束比为  $5 \times 5$ , 其归一化周期的一维突变点坐

标分别为:  $0, 0, 0, 0.03859, 0.38588, 0.65056, 1.0^{[8]}$ 。

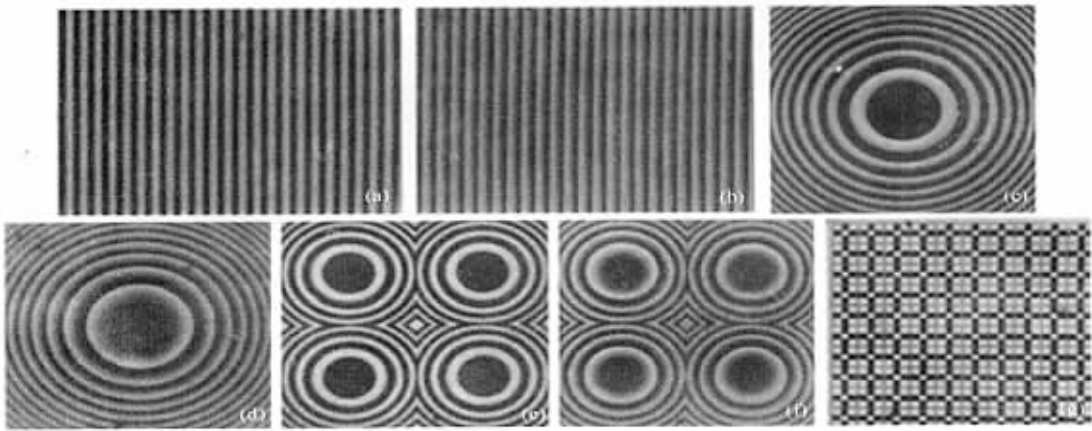


图 3 部分二元光学器件的灰度掩模

(a) 闪耀光栅的 2 阶灰度掩模; (b) 闪耀光栅的 8 阶灰度掩模; (c) 菲涅耳透镜的 2 阶灰度掩模; (d) 菲涅耳透镜的 8 阶灰度掩模; (e)  $2 \times 2$  菲涅耳透镜阵列的 2 阶灰度掩模; (f)  $2 \times 2$  菲涅耳透镜阵列的 8 阶灰度掩模; (g) Dammann 光栅的 2 阶灰度掩模

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  $2 \times 2$  Fresnel lens array; (f) eight levels mask of  $2 \times 2$  Fresnel lens array; (g) two levels mask of Dammann grating

## 5 结 论

由以上分析和实验结果知:

1) 本文提出的基于空间光调制器的灰度掩模制作系统采用逐个图形曝光方式, 一次曝光形成灰度掩模的面积达  $2.64 \text{ mm} \times 1.98 \text{ mm}$ , 相比于逐点曝光方式的激光直写或电子束直写系统而言, 可大大提高灰度掩模的制作速度。若加大曝光频率和提高空间光调制器的空间分辨率, 灰度掩模的制作速度还可进一步提高。

2) 空间光调制器的单个像素尺寸为  $33 \mu\text{m} \times 33 \mu\text{m}$ , 经投影光学系统 10 倍精缩后, 每个像素的成像面积为  $3.3 \mu\text{m} \times 3.3 \mu\text{m}$ 。若进一步减小单个像素的尺寸<sup>[9]</sup>和提高投影光学系统的精缩倍率, 可使灰度掩模的最小特征尺寸达到微米量级。

3) 空间光调制器的高灰阶数和高对比度特性, 以及灵活的视频控制及驱动系统, 有利于灰度等级的精确控制, 为生产连续轮廓浮雕结构的高性能二元光学器件提供了可能。

## 参 考 文 献

1 J. S. Thomas, C. O. Donald. Gray-scale masks for diffractive-optics fabrication: I. Commercial slide imagers [J]. *Appl. Opt.*, 1995, **34**(32):7507~7517

2 V. P. Korolkov, A. I. Malyshev, V. G. Nikitin *et al.*. Application of gray-scale LDW-glass masks for fabrication of high-efficiency DOEs [C]. *SPIE*, 1999, **3633**:129~138

3 Yan Shuhua, Dai Yifan, Lü Haibao *et al.*. Research advances in technology of laser direct writing for binary optical elements [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2002, **23**(3):159~162

颜树华, 戴一帆, 吕海宝等. 二元光学器件激光直写技术的研究进展[J]. *半导体光电*, 2002, **23**(3):159~162

4 Li Hongjun, Li Fengyou, Yu Lin *et al.*. Technique of gray-scale mask [J]. *Microfabrication Technology*, 2000, (1):10~15

李红军, 李凤有, 于利民等. 灰度掩模技术[J]. *微细加工技术*, 2002, **23**(3):159~162

5 R. W. Michael, Heng Su. Laser direct-write gray-level mask and one-step etching for diffractive microlens fabrication [J]. *Appl. Opt.*, 1998, **37**(32):7568~7576

6 K. Reimer, H. J. Quenzer, M. Jürss *et al.*. Micro-optic fabrication using one-level gray-tone lithography [C]. *SPIE*, 1997, **3008**:279~288

7 C. O. Donald, S. R. Willie. Gray-scale masks for diffractive-optics fabrication: II. Spatially filtered halftone screens [J]. *Appl. Opt.*, 1995, **34**(32):7518~7526

8 Jin Guofan, Yan Yingbai, Wu Minxian *et al.*. Binary Optics [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1998. 55~64

金国藩, 严瑛白, 郭敏贤等. 二元光学[M]. 北京: 国防工业出版社, 1998. 55~64

9 H. C. Huang, P. W. Cheng, H. S. Kwok. A high-resolution liquid crystal-on-silicon SXGA projection display [J]. *Advanced Display*, 2000, (26):24~32

黄河楫, P. W. Cheng, 郭海成. 高分辨率硅上液晶 SXGA 投影显示[J]. *现代显示*, 2000, (26):24~32