

文章编号: 0258-7025(2003)10-0893-04

实时灰阶掩膜技术制作微透镜列阵

彭钦军, 郭永康, 曾阳素, 刘世杰, 陈波, 肖啸

(四川大学物理系信息光学研究中心, 四川成都 610064)

摘要 提出一种制作连续微结构的实时灰阶掩膜技术, 它将液晶显示(LCD)系统和投影光刻系统相结合, 利用液晶显示系统实时显示一系列二值图形来获得连续的灰度记录, 给出了原理分析。基于部分相干光成像理论, 进行了微透镜制作的计算机模拟。建立了实验装置, 并采用全色卤化银明胶(Kodak131)通过酶刻蚀得到半径为 59.33 μm , 深为 1.638 μm 的 56 \times 48 微透镜列阵。

关键词 物理光学; 实时灰阶掩膜; 液晶显示; 微透镜列阵; 光刻

中图分类号 TN 305.7 **文献标识码** A

Real-time Grey-tone Mask Technique for Fabrication of Microlens Array

PENG Qin-jun, GUO Yong-kang, ZENG Yang-su, LIU Shi-jie, CHEN Bo, XIAO Xiao

(Institute of Information Optics, Department of Physics, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610064, China)

Abstract Real-time grey-tone mask technique to fabricate the microstructures is presented in this paper. It combines the advantages of programmable digital LCD system and projection photolithography system, utilizing the LCD panel to display a serial of patterns which transfer light intensity distribution with representative of height information of 3D-profile into exposure time distribution. As a result, this continuous grey image on the recording plate is obtained. This technique principle is explained. Then based on partial coherent imaging theory, the process to fabricate the microlens has been simulated. As an experiment, the microlens array has been fabricated on panchromatic silver-halide sensitized gelatin with enzyme etching. The radius of microlens and etching depths are 59.33 μm and 1.638 μm , respectively.

Key words physical optics; real-time grey-tone mask; liquid crystal display (LCD); microlens array; photolithography

1 引言

微透镜列阵在航天航空、光纤通信、光互联、信息处理、光计算等高科技领域有着广泛的应用和迫切的需求, 这极大地推动了其制作技术的发展。微光学元件通常都具有连续微浮雕结构, 而这种连续微结构一般是采用直写技术^[1,2]或者灰阶掩膜技术^[3~5]来制作的, 但直写技术所需设备比较昂贵, 制作周期长, 一般只适合高精度单件生产。用灰阶掩膜可在掩膜平面不同位置产生连续变化的透过率, 经过一次光刻过程和刻蚀后就能得到所需的连续微

结构。这种方法相对直写来说具有周期短、方法简便、无对准误差等优点而受到人们广泛关注。目前, 已有几种制作灰阶掩膜的方法, 如可以采用电子束或激光直写设备在高能束敏玻璃(HEBSG)上制作灰阶掩膜, 或利用不同的二元编码方案通过改变二元掩膜透过部分的数目或面积形成编码灰阶掩膜。然而, HEBSG 价格昂贵, 而制作灰阶编码掩膜对制版设备的分辨率要求很高, 灰阶掩膜的灰阶数越多则制作难度越大, 且不可能根据实验情况对掩膜实时修改。

本文提出一种新型的灰阶掩膜技术——实时灰

收稿日期: 2002-04-12; 收到修改稿日期: 2002-08-23

基金项目: 国家自然科学基金(批准号: 69978014)资助项目。

作者简介: 彭钦军(1976—), 男, 四川南充人, 四川大学硕士研究生, 主要从事光电信号处理和微光学的研究工作。E-mail: pengqinjun@263.net

阶掩膜技术,这种技术将液晶显示(LCD)系统与投影光刻系统相结合,利用可编程数字化的液晶显示的灵活性和投影光刻系统的并行性,它不仅在设计上体现了传统的灰阶掩膜的特点和优势,而且可以根据实验情况实时修改掩膜。从而不需要昂贵的实验设备,设计的灵活性更大,费用低廉,制作周期更短以及生成掩膜的数据量较小。

2 实时灰阶掩膜技术的原理

通过几十年深入的研究,被誉为第二半导体的液晶显示器(LCD)目前已具有相当高的分辨率、超平面显示、显示线条高清晰等特点^[6,7]。而且现在高分辨率的 LCD 一般都是直接通过电脑控制其每一像素上的均方根电压来实现图形的显示,所以控制它的每个像素变得相对容易,从而为采用高分辨率的 LCD 面板实时显示的图形直接作为灰度掩膜提供了可行的基础。

微光学元件具有三维面型,在传统的灰阶光刻中,一般是将三维面型转化成透过率不同的二维掩膜,从而调制各点的曝光强度来形成所需的曝光量分布,其曝光量可表达为

$$\phi_{\text{gray}} = I(x, y) \cdot t \quad (1)$$

式中 $I(x, y)$ 表示在抗蚀剂上的光强分布, t 表示曝光时间。在实时灰阶掩膜技术中,却是令抗蚀剂上各点的曝光强度相同,而曝光时间则不同来获得所需的曝光量分布,即

$$\phi_{\text{real}} = I \cdot t(x, y) \quad (2)$$

I 表示每点的光强, $t(x, y)$ 表示在抗蚀剂上各点的曝光时间分布。

为了在液晶显示面板上获得所需的掩膜图形,需要将生成灰度掩膜的数据转化成相应的实时灰阶掩膜图形,其方法是:首先将 3D 浮雕结构转化为灰度图形 $f(x, y)$,且令量化的灰阶数为 $2^N - 1$, N 为自然数。再将灰度分布直接对应为时间分布,然后将每一点的曝光时间转化成由 N 幅二值图形显示的时间之和,则 $f(x, y)$ 可分解为一系列二值图形 $b_n(x, y)$ 与 2^{n-1} 的乘积之和,即

$$f(x, y) = \sum_{n=1}^N 2^{n-1} \cdot b_n(x, y) \quad (3)$$

n 为自然数。由公式(3)则可以求出 $b_n(x, y)$,若 $b_n(x, y)$ 形成的二值图形通过投影光刻系统在抗蚀剂上形成的光强分布为 $I_n(x, y)$,则在抗蚀剂上得到的总的曝光量分布为

$$\phi_{\text{real}} = \sum_{n=1}^N 2^{n-1} \cdot I_n(x, y) \cdot t_0 \quad (4)$$

t_0 是与曝光时间有关的待确定的参数,它可这样确定,首先根据掩膜的透射光强大小和所需总的曝光量决定总曝光时间,设为 t_{total} ,则

$$t_0 = t_{\text{total}} / \left(\sum_{n=1}^N 2^{n-1} \right) \quad (5)$$

由此可见,由 N 幅图形就可以实现对 3D 微结构的高度分布量化 $2^N - 1$ 阶,比如量化 $255 = 2^8 - 1$ 阶,则仅仅需要 8 幅图形就可实现,因此,这种方法即使量化较多的灰阶数,而掩膜生成的数据量却增加缓慢。

根据以上原理,编制了制作微透镜的实时灰阶掩膜程序,设定量化灰阶数为 31 阶,得到 5 幅 2 值的掩膜图形 $b_n(x, y)$ ($n = 1, 2, \dots, 5$),如图 1 所示,它们被计算机控制分别按照 $2^{n-1} \times t_0$ 的时间在 LCD 面板上显示就形成了实时灰阶掩膜。

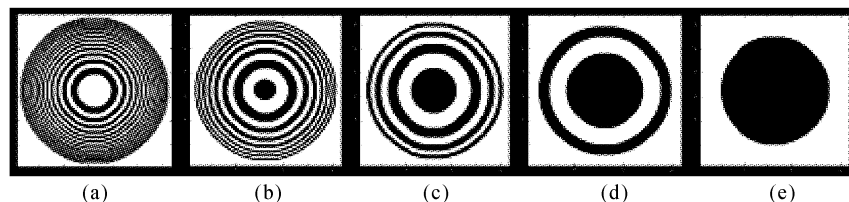


图 1 微透镜的 5 幅掩膜图形

Fig. 1 Five mask patterns for microlens

3 计算机模拟

由公式(4),求出微透镜的每一幅掩膜图形在抗蚀剂上成像后的光强分布,再乘以曝光时间得到其曝光量分布,然后将它们相加,可求出总曝光量分布。由于实时灰阶掩膜是由部分相干光照明,所以

计算公式(4)中的每幅掩膜图形的像面光强是基于部分相干成像理论,分析互强度的传递。像面的互强度为^[8]

$$J_i(x_{i1}, y_{i1}, x_{i2}, y_{i2}) = \iiint J_o(x_{o1}, y_{o1}, x_{o2}, y_{o2}) \times h_i(x_{i1} - x_{o1}, y_{i1} - y_{o1}) \times$$

$$h_i^*(x_{i2} - x_{o2}, y_{i2} - y_{o2}) \times \int \int dx_{o1} dy_{o1} dx_{o2} dy_{o2} \quad (6)$$

其中 $J_o(x_{o1}, y_{o1}, x_{o2}, y_{o2})$ 为物面上的互强度, $h_i(x_i, y_i, x_o, y_o)$ 为系统的点扩展函数。根据霍布金斯的有效光源概念, 由上式进而可以得到像面上的光强分布公式

$$I_i(x_i, y_i) = \iint_{\sigma} I_{\text{eff}}(x_s, y_s) \times \left| \iint U(f_x, f_y) H(x_s - f_x, y_s - f_y) \exp[j2\pi(f_x x_i + f_y y_i)] df_x df_y \right|^2 dx_s dy_s \quad (7)$$

这里 $I_{\text{eff}}(x_s, y_s)$ 代表有效光源的光强, $H(x_s - f_x, y_s - f_y)$ 为光瞳函数, $U(f_x, f_y)$ 为物频谱, $x_i, y_i, x_s, y_s, f_x, f_y$ 均表示归一化坐标。取部分相干因子 $\sigma = 0.8$, 数值孔径为 0.5, 波长为 $0.5 \mu\text{m}$, 通过程序对每一幅掩膜成像后的光强进行了计算以及分别求出了微透镜的总曝光量分布。图 2, 3 所示为微透镜曝光量分布的球冠状图及其平视的轮廓图(曝光量采用归一化坐标), 由此可见, 计算机模拟结果与所设计的结果一致。

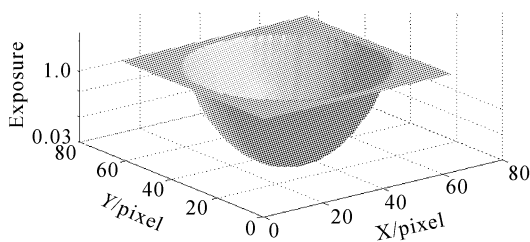


图 2 微透镜曝光量分布

Fig. 2 Exposure dose distribution of microlens

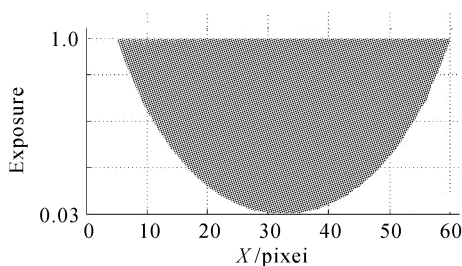


图 3 微透镜曝光量分布的平视轮廓图

Fig. 3 Outline of exposure dose distribution of microlens with orthophoria

4 实验

为了从实验上进一步证明实时灰阶掩膜的原理, 采用 ACER 液晶显示器件(分辨率为 1024×768 , 像素边长为 $99 \mu\text{m}$)建立了实验装置, 如图 4 所

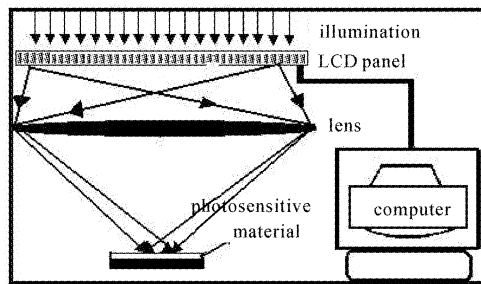


图 4 液晶实时掩膜制作连续微结构的基本原理图

Fig. 4 Experimental system for LCD mask lithography

示。并用 Kodak131 全色卤化银明胶作为记录材料, 其感光波长范围为 $400 \sim 680 \text{ nm}$ 。计算机输出掩膜数据通过显示卡在 LCD 上显示的图形经缩拍透镜精缩一定的倍数后成像在感光材料上, 精缩倍数的最大值必须根据光刻系统的分辨本领来确定, 即液晶像素经过缩拍后的大小必须大于成像系统可分辨的最小尺寸。通过对已有的卤化银明胶处理工艺^[9]进行改进, 将灰度银像转化成明胶硬度潜像, 最后采用酶蚀显影工艺把潜像显现为连续的浮雕结构。采用酶蚀显影的目的是加深浮雕深度。在显影时改用了 Kodak D-76 显影液和调节了 R-10 的 A 液和 B 液的比例, 因为当空频在 600 lines/mm 以下时用稀释 D-76 比用 PAAP 得到的衍射效率更高以及可获得最佳的灰度-曝光量线形关系。将 R10 漂白液的 A 液, 去离子水, B 液的比例由 $1:10:30$ 调到 $1:10:0.5$, 即降低了 B 液的浓度, 这样有利于制作低频深浮雕的微结构, 改进后的主要处理步骤如下:

先曝光 90 s, 然后用 Kodak D-76(稀释 1:3)显影 2.5 min, 停影液中停显 20 s, 用改进的 R-10 漂白液漂白 5 min 后, 用 Kodak S-13B 液清洁 1 min, 放入 F-24 定影液定影 5 min, 最后用 0.1% 的胰酶水溶液($\text{pH}=7, 30^\circ\text{C}$)处理 5~15 min 和在 80°C 的烘

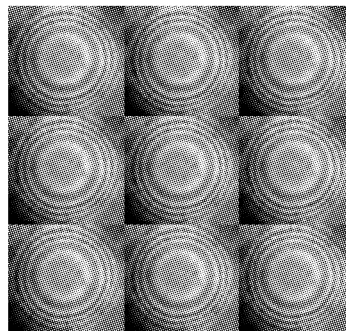


图 5 微透镜阵列的干涉显微照片

Fig. 5 Interference pattern of microlens array

箱中烘 1 h 使其干燥。

最后成功地制作了半径为 $59.33 \mu\text{m}$, 深为 $1.638 \mu\text{m}$ 的凹微透镜列阵。图 5 为微透镜列阵的干涉显微照片, 图 6 是它的表面轮廓测量结果 (Alpha-step 500 型表面轮廓仪测量)。

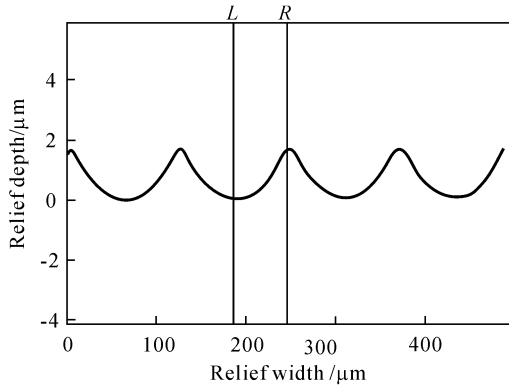


图 6 微透镜列阵的轮廓图(alpha step 500)

Fig. 6 Profile measurement of microlens array
(alpha step 500)

5 结 论

本文提出了一种新型的灰阶掩膜技术——实时灰阶掩膜技术, 它利用 LCD 空间光调制器将连续的灰度图形转化成一系列二值图形的实时显示, 在记录板上获得连续的灰度分布。通过计算机模拟分析了利用实时掩膜制作微透镜列阵的原理并从实验上成功制作了良好面型的微透镜列阵。这里提出的实时掩膜原理同样可适用于利用其他空间光调制器 (如 DMD 数字微反射镜, 只是目前它价格较贵, 不易购买) 来制作微结构。这种技术不仅具有传统灰

阶掩膜的优点, 而且还可以实时修改掩膜, 生成的掩膜数据量小, 成本低, 制作周期短和设计特别灵活, 为制作微结构提供了一种新途径。

参 考 文 献

- 1 A. Nottola, A. Gerardino, M. Gentili *et al.*. Fabrication of semi-continuous profile diffractive optical elements for beam shaping by electron beam lithography [J]. *Microelectron. Eng.*, 2000, **53**:325~328
- 2 E. B. Kley, B. Schnabel, U. D. Zeitner. E-beam lithography-an efficient tool for the fabrication of diffractive and microoptical elements [C]. *SPIE*, 1997, **3008**:222~228
- 3 H. J. Jiang, X. C. Yuan, Z. S. Yun *et al.*. Fabrication of microlens in photosensitive hybrid sol-gel films using a gray scale mask [J]. *Materials Science and Eng.*, 2001, **16**:99~102
- 4 T. Lippert, C. David, M. Hauer *et al.*. Polymers for UV and near-IR irradiation [J]. *J. Photochem. Photobiol. A: Chem.*, 2001, **145**:87~92
- 5 N. Dumbravescu. Experiments for 3-D structuring of thick resists by gray tone lithography [J]. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 2000, **3**:569~573
- 6 J. Aiken, B. Bates. Programmable color liquid-crystal television spatial light modulator: transmittance properties and application to speckle-correlation displacement measurement [J]. *Appl. Opt.*, 2000, **39**(2):337~344
- 7 B. M. Tian. *Electronic Display* [M]. Beijing: Publishing House of Tsinghua Univ., 2001, Chapter 2: 27~103 (in Chinese)
- 8 H. H. Hopkins. On the diffraction theory of optical images [C]. *Proc. Roy. Soc. A*, 1953, **217**:408~432
- 9 A. Fimia, I. Pascual, A. Belendez. Optimized spatial frequency response in silver halide sensitized gelatin [J]. *Appl. Opt.*, 1992, **31**(20):4625~4627