

文章编号: 0253-2239(2003)02-0220-05

液晶实时掩膜技术制作连续微光学元件*

彭钦军 郭永康 陈 波 刘世杰 曾阳素

(四川大学物理系信息光学研究中心, 成都 610064)

摘要: 提出制作连续微光学元件的一种新技术——液晶实时掩膜技术, 阐述了其基本原理和制作方法。基于部分相干光成像理论, 采用计算机模拟了用实时掩膜制作微透镜和微轴锥镜阵列的过程。同时建立了实验装置进行实验, 用全色银盐干板(Kodak-131)通过酶刻蚀得到口径为 118.7 μm , 深为 1.322 μm 的 56 \times 48 的轴锥镜的阵列。

关键词: 应用光学; 实时掩膜; 液晶显示器件; 连续微光学元件; 光刻

中图分类号: TN201 文献标识码: A

1 引 言

连续微光学元件在光通信、光学信息处理、光存储和激光束扫描等许多领域里有着广泛的用途。目前用于制作连续微光学元件的技术有激光直写^[1]、电子束直写^[2]、灰阶掩膜^[3,4]和灰阶编码^[5]等。总的说来, 这些技术存在如下一些缺点: 制作工艺和设备相对复杂、设计的灵活性小、费用昂贵、制作周期长等等。而且, 如果采用常规掩膜制作微结构, 不可能根据实验情况对掩膜实时修改。

本文提出一种可以对掩膜根据实验情况实时修改的液晶实时掩膜技术, 它将液晶显示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, 大大简化了光刻过程, 不需要制作常规掩膜及其所需的昂贵设备, 无须套刻, 从而不存在对位误差, 而且具有费用低廉、设计灵活性大、制作周期特别短、不受限于任何特殊的表面形状以及对空间像的传递、抗蚀剂曝光、显影和刻蚀过程的非线性校正相对简单等优点。

2 实时掩膜技术基本原理

最近几年来, 平板显示技术发展迅速, 尤其以液晶显示器件最为突出。而且现在高分辨率的液晶显示器件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^[6], 同时液晶显示器件是采用大规模集成电路等综合技术制作, 所以目

前液晶显示器件能够实现相当高的分辨率、超平面显示、显示线条清晰度高且控制方便, 这为我们把它显示的图形直接视作掩膜进行微光学元件的制作提供了可行的基础。从而, 制作微光学元件的掩膜图形就可以通过计算机方便地随时制作和修改, 所以我们称之为实时掩膜。连续微光学元件的浮雕结构是三维的, 但是液晶显示器件显示的是二维图形, 所以需要三维结构转化为二维图形并在抗蚀剂上形成所需的曝光量分布。由于液晶显示器件可以方便地通过计算机控制逐帧地显示动态的图形, 而且相邻两帧图形之间的转换时间目前大约低于 40 ms (与液晶响应时间相当), 每帧图形的显示时间可以自由设定。基于此我们提出的实时掩膜技术基本原理是: 将三维微结构的高度进行量化, 根据不同的高度求出其相应的等高面, 将这些等高面图形由液晶显示器件逐帧显示, 每帧显示的时间由其相应的高度确定, 各帧显示的时间总和就是总曝光时间。因此, 引入时间自由度调节参量, 就将三维任意面型转换成了一系列二维图形的逐帧动态显示, 用时间和微结构的等高面图形的光强分布来调制曝光量的分布, 最后在抗蚀剂上就可以形成所需的连续曝光量分布。

以下, 我们以微轴锥镜为例来具体说明其基本原理。假如微轴锥镜的最大口径为 R , 高为 h , 如图 1 所示, 其三维面型函数在笛卡儿坐标系中可以写成

$$z^2 = (x^2 + y^2)h^2/R^2,$$

$$(0 \leq z \leq h, x^2 + y^2 \leq R^2) \quad (1)$$

则它在 xy 面的等高线图如图 2 所示, 其相应的一系列等高面函数可以表示为

$$x^2 + y^2 \leq r_i^2, \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (2)$$

* 国家自然科学基金(69978014)资助课题。

E-mail: pengqinjun@263.net

收稿日期: 2002-01-22; 收到修改稿日期: 2002-05-27

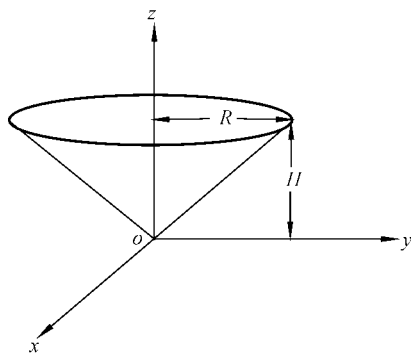
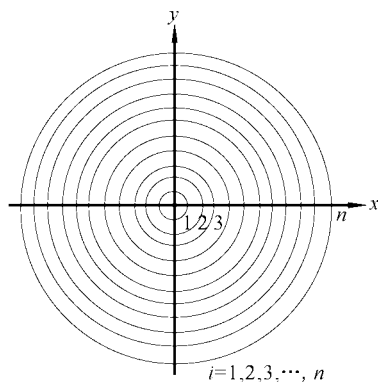
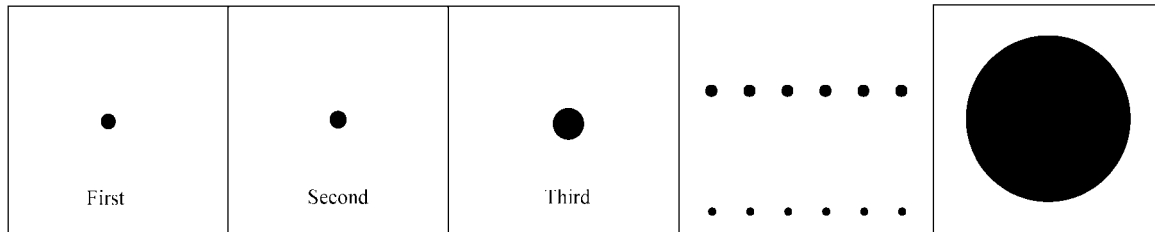


Fig. 1 Axicon in the Cartesian system of coordinates

Fig. 2 Contour of axicon in the xoy planeFig. 3 A serial of graphics of axicon for real-time mask (from first to n -th frame)

3 计算机模拟

根据以上原理,我们进行了用液晶实时掩膜制作微透镜和微轴锥镜的过程的计算机模拟。它们都被量化 32 阶,则分别可求得 32 幅等高面图形。根据(4)式,求出每一幅图形在抗蚀剂上通过成像后的

其中 r_i 为高度为 h_i 时对应的等高面的半径值, $0 < r_i < R$, n 为被投影的等高面的数目,即上式中对高度进行量化的阶数。量化的阶数越多,得到的曝光量分布均匀性越好,但 n 的最大值由液晶显示器件的分辨率和所做元件的最大横向尺寸所决定。假如用正性抗蚀剂制作凸轴锥镜,由(2)式所形成的一系列图形的透过率函数则可以表示为

$$T_i(x, y) = \begin{cases} 0, & x^2 + y^2 \leq r_i^2 \\ 1, & x^2 + y^2 > r_i^2 \end{cases} \quad (3)$$

即在等高面内不透光,在等高面外透光。将这些等高面的图形按顺序从第一幅到第 n 幅由液晶显示器件显示,每幅图形的显示时间根据量化的高度确定,假如第 i 幅等高面图形通过缩拍后,在抗蚀剂上形成的光强分布为 I_i ,显示的时间为 t_i ,则在抗蚀剂上得到的总的曝光量分布为

$$\phi_{\text{total}} = \sum_{i=1}^n I_i t_i, \quad (4)$$

调节 t_i 和 I_i 就可以得到所需的曝光量分布。时间 t_i 可这样确定,首先根据掩膜的透射光强的大小和抗蚀剂所需的曝光量决定总曝光时间,假如它是 90 s,量化元件高度间隔相等且为 30 阶,在线性曝光条件下,则每幅等高面图形的显示时间为 $90 \text{ s}/30 = 3 \text{ s}$ 。轴锥镜的一系列掩膜图形如图 3 所示。

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。由于液晶实时掩膜是由部分相干光照明,(4)式中的空间像的光强分布应根据部分相干光理论和霍布金斯等效光源的概念表达为^[7]

$$I_i(x_i, y_i) = \iint_{\sigma} I_s(x_s, y_s) \left| \iint U(f_x, f_y) H(x_s - f_x, y_s - f_y) \exp[i2\pi(f_x x_i + f_y y_i)] df_i \right|^2 dx_s dy_s, \quad (5)$$

式中 σ 为曝光系统的部分相干因子, $I_s(x_s, y_s)$ 为有效照明光源的光强分布(即照明函数), $H(x_s - f_x,$

$y_s - f_y)$ 为系统的光瞳函数,其中 x_s, y_s, f_x, f_y 为归一化变量, $U(f_x, f_y)$ 为物频谱。取部分相干因子

$\sigma = 0.8$, 数值孔径为 0.5, 波长为 $0.5 \mu\text{m}$, 通过程序对每一幅等高面图形成像后的光强进行了计算以及分别求出了微透镜和轴锥镜的总曝光量分布。图 4、图 5 所示的是微透镜和微轴锥镜曝光量分布轮廓图, 图 6 是它的投影等高线图(曝光量采用归一化坐标)。可以从图 4~图 6 看出, 在线性曝光条件下, 模拟计算的曝光量分布与设计值一致。

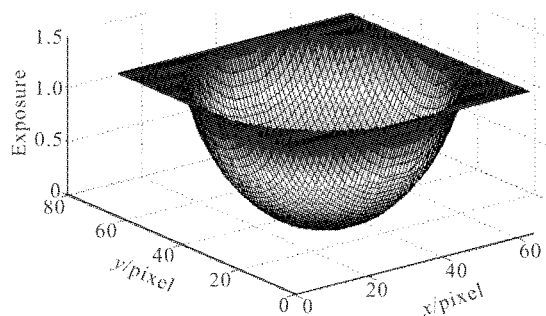


Fig. 4 Exposure dose distribution of microlens

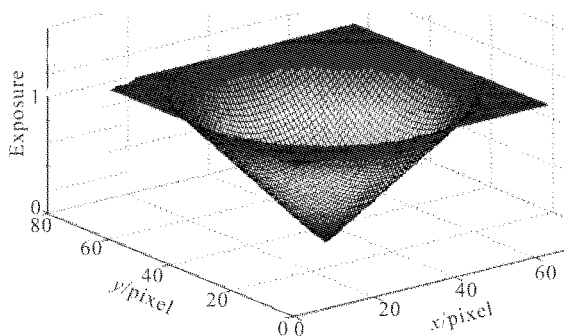


Fig. 5 Exposure dose distribution of axicon

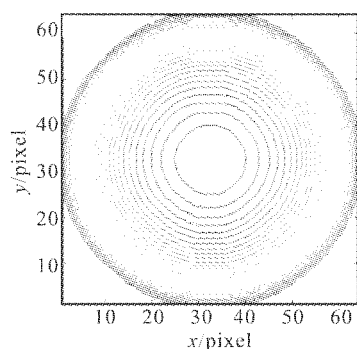


Fig. 6 Contour lines of exposure dose distribution of microlens (32 steps)

4 实 验

为了从实验上进一步证明液晶实时掩膜的原理, 我们采用易于购买的透射式彩色液晶显示器件(黑白液晶显示器件同样可行), 通过计算机控制输出的图形作为实时掩膜, 并用 Kodak-131 全色银盐干板作为

记录材料进行了实验。图 7 是透射式彩色扭曲向列相型液晶器件的构造示意图^[8]。它由两个玻璃板组成, 玻璃板内壁镀有透明电极, 分成像素电极和公共电极, 公共电极下是彩色滤光片, 分别是红、绿、蓝(R、G、B)三色, 每一组 RGB 对应一个像素。

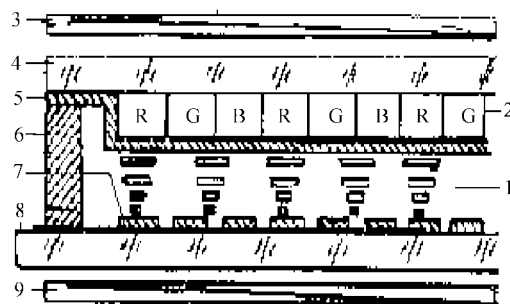


Fig. 7 Profile of color LCD with twisted nematic molecule. 1: Liquid crystal; 2: color filter; 3: analyzer; 4: upper glass plane; 5: common electrode; 6: separator; 7: pixel electrode; 8: lower glass plane; 9: polarizer

图 8 表示理想的三基色透射光谱, 图中 C_i 为透射率。玻璃板之间充入各向异性的向列相液晶, 在两个玻璃板外, 分别放置一个起偏器和一个检偏器, 典型情况是起偏器和检偏器的偏光轴均与 x 轴平行。

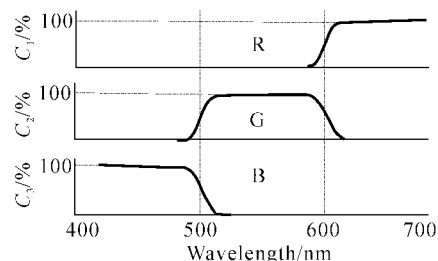


Fig. 8 Spectral transmittance of tristimulus

如图 9 所示液晶分子的排列模式, 沿 z 方向入射的光线经起偏器后变成线偏振光, 线偏振光通过液晶层后的性质与沿 z 方向外加的电场有关。无电场时, 没有光透射出来, 称为关态, 当电场大于某一阈值后, 光被透射出液晶层, 成为开态。根据实时掩膜原理, 我们仅仅利用了开态和关态两种状态。

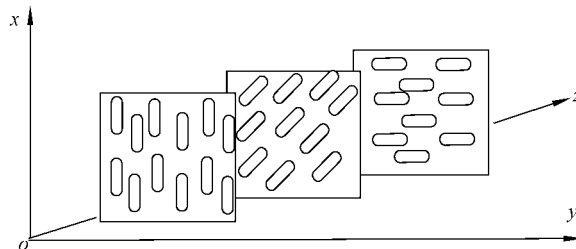


Fig. 9 Arrangement model of twisted nematic molecules

利用台湾 ACER 液晶显示面板(分辨率为 1024×768 , 每个像素的边长为 $99 \mu\text{m}$)我们建立了实验装置,如图 10 所示。计算机输出掩膜数据通过显示卡在液晶显示器件上显示,显示的图形通过缩拍透镜 Lens 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,这样才能在光敏材料上获得高质量的成像,其中,实验光刻系统的工艺系数为 0.7,数值孔径 0.48。

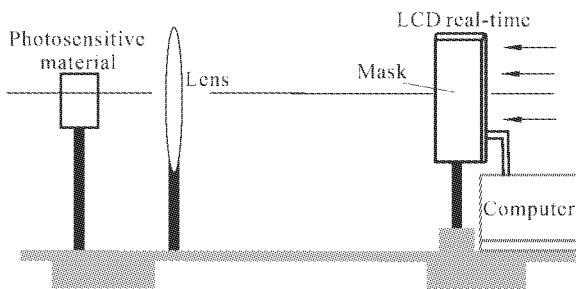


Fig. 10 Principle setup for fabrication of microoptical elements with LCD real-time masks

根据图 7 的 RGB 像素排列和图 8 的三基色透射率,我们选择的 Kodak-131 全色银盐干板的感光波长范围是 $400 \sim 680 \text{ nm}$ 。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沟形的浮雕结构,改进部分除了采用酶蚀显影加深浮雕深度外,主要还采用了 Kodak D-19 显影液,并调节了 R-10 的 A 液和 B 液的比例,因为当空频在 600 l/mm 以下时用 D-19 比用 PAAP 型显影液得到的衍射效率更高,并可获得最佳的灰度分布,将文献中的 R10 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,改进后的处理步骤如下:

- 1) 曝光 90 s;
- 2) 用 Kodak D-19 显影 2 min,温度为 $20 \text{ }^\circ\text{C}$;
- 3) 停影液中停显 20 s,动水冲洗后再用去离子水冲干净,温度为 $20 \text{ }^\circ\text{C}$;
- 4) 漂白:用改进 R-10 液,3 min,动水冲洗 3 min后,再用去离子水冲干净,温度为 $20 \text{ }^\circ\text{C}$;
- 5) 用 Kodak S-13B 液清洁 1 min,温度为 $20 \text{ }^\circ\text{C}$;
- 6) 用 F-5 定影液定影 5 min,动水冲洗 5 min后,再用去离子水冲干净,温度为 $20 \text{ }^\circ\text{C}$;
- 7) 用 0.2%的胰酶(活性为 601 U/mg)水溶液($\text{pH}=7$)处理 $5 \sim 15 \text{ min}$,温度为 $35 \text{ }^\circ\text{C}$;

8) 动水冲洗 3 min 后,再用去离子水冲洗干净,温度为 $20 \text{ }^\circ\text{C}$;

9) 在温度为 $80 \text{ }^\circ\text{C}$ 的烘箱中烘 1 h。实验得到最大口径为 $118.7 \mu\text{m}$,深为 $1.322 \mu\text{m}$ 的轴锥镜阵列。图 11 是微轴锥镜阵列的干涉显微照片,图 12 是它的表面轮廓测量结果(用 Alpha-step 500 型表面轮廓仪测量)。最后用迈克耳孙干涉仪的移动臂移动 CCD 记录了轴锥镜的焦线长度为 4.902 mm ,设计值为 5 mm (即设计的轴锥镜口径为 $126.7 \mu\text{m}$,深为 $1.480 \mu\text{m}$,材料的折射率为 1.5402,其设计指标要求焦线长度误差不大于 3%),从而焦线长度的误差为 1.96%,其口径误差为 6.3%,深度误差为 10.7%。口径误差是由于投影成像过程的非线性以及湿法刻蚀所普遍存在的横向钻蚀及测量误差等因素造成的,深度误差是由于酶刻蚀时间控制不准以及显影刻蚀过程的非线性等原因造成的。

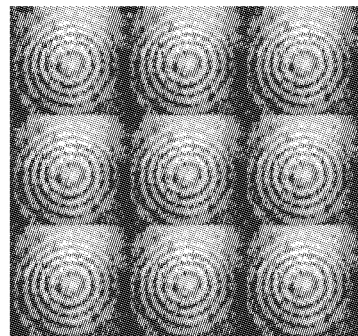


Fig. 11 The interference pattern of micro-axicon array

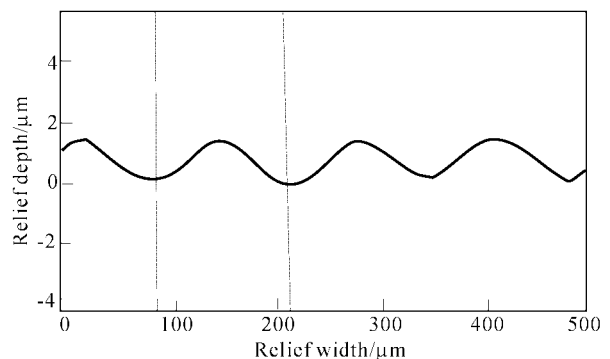


Fig. 12 Profile measurement of micro-axicon array

结论 本文提出了用液晶实时掩膜制作微浮雕结构的新技术,通过计算机模拟分析了掩膜生成的原理并从实验上成功地制作了微轴锥镜阵列。这种技术利用了液晶显示系统和投影光刻系统的优点,将三维浮雕结构分解为一系列等高面图形,然后由计算机控制逐帧显示每幅图形,从而实现一步光刻,它为

连续微浮雕结构的光刻提供了一条简捷有效的途径。在本文中采用液晶显示器件作为空间光调制器进行了实验,对于其他类型空间光调制器如数字微反射镜(Digital Micromirror Device)阵列也同样可行,只是其价格较贵且不易购买。在本实验中,由于受所采用的液晶显示器件分辨本领的限制,实时掩膜的特征尺寸是微米量级,随着液晶材料的改进和液晶空间光调制器的分辨本领的不断提高,这种技术可用于亚微米级的光刻。

参 考 文 献

- 1 Gale M T, Rossi M, Pedersen J. Fabrication of continuous-relief micro-optical element by direct laser writing in photoresist. *Opt. Engng.*, 1994, **33**(11):3556~3566
- 2 Kley E B, Schnabel B, Zeitner U E. E-beam lithography-an efficient tool for the fabrication of diffractive and microoptical element. *Proc. SPIE*, 1997, **3008**:22~28
- 3 Sixt O P, Stauffer J M, Mayer J M *et al.*. One-step 3D shaping using a grey-tone mask for optical and microelectronic applications. *Microelectron. Engng.*, 1994, **23**:449~454
- 4 Suleski T J, O'Shea D C. Gray-scale masks for diffractive-optics fabrication: 1. Commercial slide imagers. *Appl. Opt.*, 1995, **34**(32):7507~7517
- 5 Henke W, Hoppe W, Quenzer H J *et al.*. Simulation and process design of gray-tone for the fabrication of arbitrarily shaped surface. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 1994, **33-1**(12B):6809~6815
- 6 Lu K, Saleh B E A. Theory and design of the liquid crystal TV as an optical spatial light modulator. *Opt. Engng.*, 1990, **29**(3):240~245
- 7 Hopkins H H. On the diffraction theory of optical images. *Proc. Roy. Soc.*, 1953, **A217**:408~432
- 8 Tian B M. *Electronic Display*(电子显示). Beijing: Publishing House of Tsinghua Univ., 2001. 27~103 (in Chinese)
- 9 Fimia A, Pascual I, Belendez A. Optimized spatial frequency response in silver halide sensitized gelatin. *Appl. Opt.*, 1992, **31**(20):4625~4627

LCD Real-Time Mask Technique for Fabrication of Continuous Microoptical Elements

Peng Qinjun Guo Yongkang Chen Bo Liu Shijie Zeng Yangsu

(*Institute of Information Optics, Department of physics, Sichuan University, Chengdu 610064*)

(Received 22 January 2002; revised 27 May 2002)

Abstract: A new technique for fabrication of continuous microoptical elements by using LCD (liquid crystal display) real-time mask is proposed, and its principle and design method are expatiated. Based on partial coherent imaging theory, the process to fabricate the micro-axicon and the microlens has been simulated. The experimental setup for LCD real-time mask technique was built by using the color LCD in authors' laboratory. and the micro-axicon array has been fabricated. The 3-dimensional surface relief structure was shaped in the pan chromatic silver-halide sensitized gelatin (Kodak-131) with trypsinase etching. The caliber of axicon is $118.7 \mu\text{m}$, and the etching depth is $1.322 \mu\text{m}$.

Key words: applied optics; real-time mask; liquid crystal display (LCD); continuous microoptical elements; photolithography