

制作任意形状微结构的 LCD 实时掩模技术

摘要: 本文介绍了一种利用液晶显示 (LCD) 实时掩模制作任意形状微结构的新技术, 并且阐述了该技术的原理和设计方法。基于部分相干成像理论, 仿真了制造微轴锥体和锯齿形光栅的过程。在实验中使用彩色 LCD 作为实时掩模, 成功地用 LCD 实时掩模技术制作出微轴锥体和锯齿形光栅。实验中采用胰蛋白酶刻蚀技术将三维外形结构刻蚀在全彩色的感光银盐明胶片上, 所得到的锯齿形光栅的节距为 $46.26\mu\text{m}$, 刻蚀深度为 $0.902\mu\text{m}$; 轴锥体的直径为 $118.7\mu\text{m}$, 蚀刻深度为 $1.332\mu\text{m}$ 。

1 引言

在现代微光学和微机械加工领域, 任意形状三维微结构的制作技术已引起各国科学家们的广泛关注。目前已开发了多种任意形状三维微结构的制作技术, 其中包括激光束直写、电子束直写以及具有可编码灰度掩模的灰度光刻等。一般说来, 这些技术不但复杂、费时且昂贵, 其掩模设计过程也难于实现, 并缺乏灵活性。如一旦一个设计被刻蚀到掩模上, 它便是不可更改的, 除非重新刻蚀一个新的掩模。

本文介绍了一种基于 LCD 实时掩模的新光刻技术。这是一种廉价的单步光刻技术, LCD 掩模能够根据实验情况进行实时的更改。该技术充分地利用了可编程数字 LCD 系统的灵活性和投影光刻系统的并行性, 有效地将二者的优点结合在一起。当一块单一的 LCD 掩模能够代替一整套的传统掩模时, 传统的光刻法将得以大幅简化。对于 LCD 掩模来说, 传统的光刻法中不同掩模水平面之间的水平对齐是不必要的。因为掩模图案能够实时地得到调整, 因而有利于补偿空间像以及感光材料的曝光、显影和底板刻蚀过程中的任何非线性影响。

2 LCD 实时掩模技术的原理

在过去的 10 年间, 科学家们对液晶和 LCD 的特性进行了广泛的研究。目前已实现通过计算机直接地控制施加在每一个像素点上的电压。与

此同时, 制造 LCD 的工艺已达到非常先进的水平, 这些发展使得利用高分辨率 LCD 屏成为可能。这种 LCD 屏具有逐像素的可控性, 可作为灰度光刻法的光掩模。

大多数的微光学元件均要求具有三维结构。采用传统的灰度光刻法, 需对一个二维的掩模编码, 以便光强能够通过掩模产生预期的曝光剂量分布而得到调整, 并通过灰度掩模的曝光形成感光材料的三维结构。目前已研制成功一种能代替灰度掩模的具有实时控制像素点转换功能的 LCD 屏。为了在光刻中应用 LCD, 首先要将一个三维微结构高度分割为若干个等高面, 每一个等高面对应于一个三维结构的特定高度。所有的等高面均存储在计算机中, 由计算机控制 LCD 屏逐帧地显示等高面, 然后逐帧地将感光材料曝光。曝光时间由每帧的显示时间所决定, 而显示时间是三维结构高度的函数。对于需要较高曝光剂量的某一特定高度的等高面, 曝光的时间

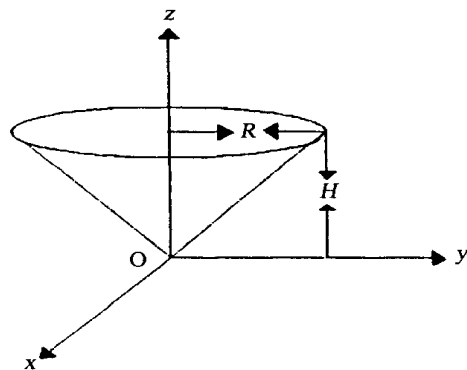


图 1 直角坐标系中的轴锥体

相对长一些。因此,相对于传统灰度掩模中的光强调整,可通过调整曝光时间来达到与灰度掩模相同的效果。总曝光时间是所有等高面帧的显示时间之和。

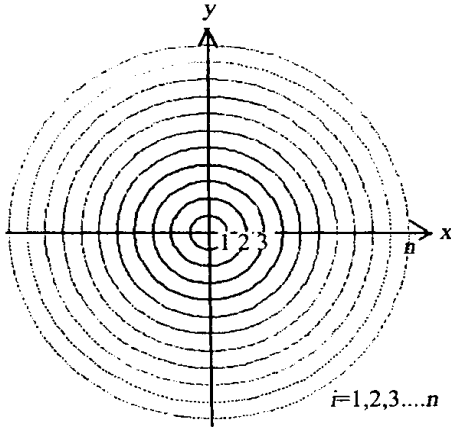


图 2 轴锥体在 X - Y 平面内各高度的等高线

用一个微轴锥体形状(即一个具有圆锥外形的镜片)来解释这一原理(如图 1 所示)。假定 R 是轴锥体的半径, h 是其高度,那么在直角坐标系中的轴锥体结构的公式可用下式表达为:

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

在 X - Y 平面直角坐标系内计算和绘制了轴锥体的等高线(如图 2 所示)。每一个等高面可以表示为:

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

其中: r_i 是相应的第 i 个等高面的半径, $0 < r_i < R$ 。 n 表示等高面的总数,即高度所分割的阶数。显而易见,高度分割得越细,外形就越理想。然而,有时必须在 LCD 屏的分辨率和随着分割

阶数的增加而急剧增加的掩模数据容量之间进行折衷。如果凸起状的轴锥体是由正离子感光材料制作的,根据公式(2),第 i 个等高面的光传播可表示为:

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

也就是说,光不是在等高面内部区域传播,而是在等高面外部区域传播。LCD 屏从第一帧到第 n 帧逐一地显示这些等高面。如果第 i 帧的显示时间为 t_i ,在感光材料表面上第 i 帧的图像光强分布为 I_i ,那么总曝光剂量可由下式计算得出:

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

通过适当地调整参数 t_i 和 I_i , 便能获得任意的曝光剂量分布以形成预期的感光材料外形。充分曝光光敏层的总曝光时间首先应该由通过 LCD 的光强和感光材料的灵敏度来决定。假定在感光材料的显影和刻蚀过程中,图像转换是线性的,而整个高度被分割为 30 阶,并且任何相邻两阶之间的高度是相等的,如果时间为 90s,那么每帧的显示时间可以表示为 $90s / 30 = 3s$ 。图 3 给出了一系列微轴锥体的 LCD 掩模图像。在投影光刻中,LCD 掩模图像需要通过一个聚焦透镜对其缩小。由于光学成像系统中的衍射,将会增加空间像的扭曲程度,因此对于 LCD 实时掩模来说,可以在 LCD 帧的显示过程中加入一个补偿设计,即调整每个等高面帧的显示时间以纠正在感光材料的显影和刻蚀过程中的非线性影响,从而在感光材料上形成预期的三维结构。

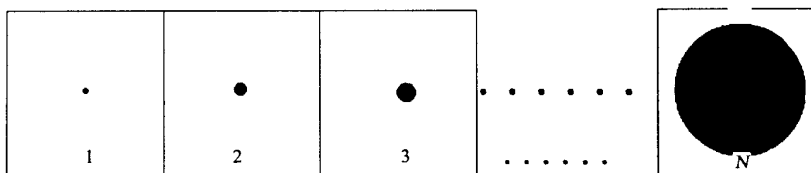


图 3 不同高度等高面的 LCD 掩模图像

3 仿 真

基于上述原则,科技人员利用 LCD 实时掩模技术仿真轴锥体和锯齿形光栅结构的光刻法的成像过程。将锯齿形光栅的总高度分割成 20 阶,而将轴锥体的总高度分割成 64 阶,然后分别计算和绘制其等高面,并计算出每个等高面空间像的光强分布。每个等高面的曝光剂量等于光强乘以其相应的显示时间,整个曝光剂量是所有等高面的曝光剂量之和。用一个部分相干光源照明 LCD 实时掩模。根据部分相干成像理论和光源的霍普金斯效应的概念,分布在图像表面的光强可表示为:

$$I_{image}(x_i, y_i) = f(\lambda, NA, T_{object}(x_0, y_0)) \\ = I_{eff}(x_s, y_s) \int U(f_x, f_y) H(x_s - f_x, y_s - f_y) \\ \times \exp[j2\pi(f_x x_i + f_y y_i)] df_x df_y / \lambda^2 dx_s dy_s, \quad (5)$$

其中: $T_{object}(x_0, y_0)$ 为掩模的复振幅传播函数; NA 是物镜的数值孔径; λ 为曝光光源的波长; $U(f_x, f_y)$ 为光源的部分相干因数; $I_{eff}(x_s, y_s)$ 为参考光的光强; $H(x_s - f_x, y_s - f_y)$ 为瞳孔函数; $T_{object}(x_0, y_0)$ 为物体的频谱。目前已开发出一种计算 LCD 实时掩模的每帧图像光强分布和总曝光剂量分布的程序。所计算出的锯齿形光栅和轴锥体的曝光剂量分布如图 4 和图 5 所示($\lambda = 0.5\mu\text{m}$, $\sigma = 0.8$, $NA = 0.5$)。轴锥体曝光剂量分布的等高线图如图 6 所示。然而,由于衍射的影响,实际曝光剂量分

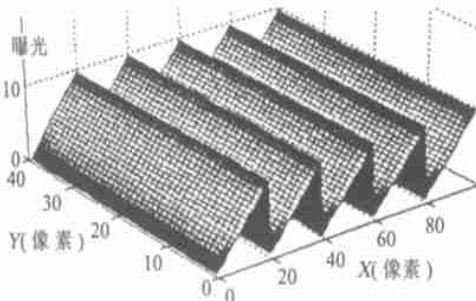


图 4 锯齿形光栅的曝光剂量分布图

布和理想曝光剂量分布之间存在着很微小的差异。

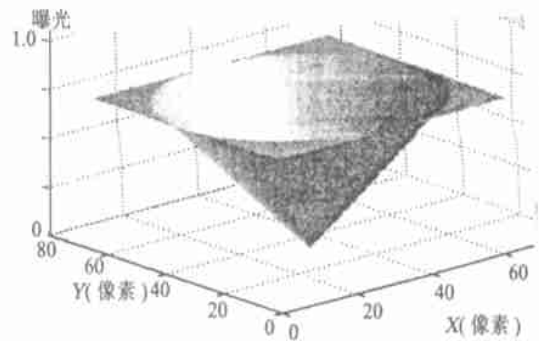


图 5 轴锥体的曝光剂量分布图

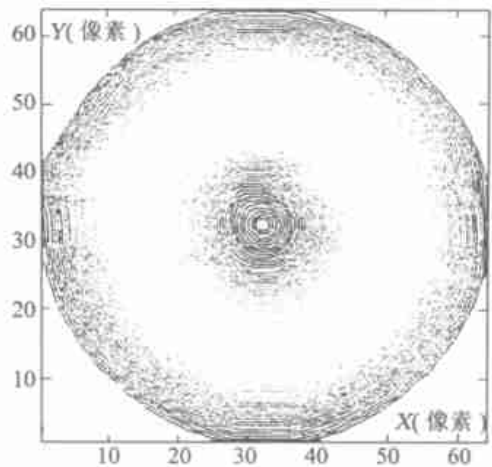


图 6 制作轴锥体的 LCD 掩模的曝光剂量分布等高线

4 实 验

为了进一步验证 LCD 实时掩模技术的原理,人们已经开始进行全彩色感光银盐明胶片的光刻成像实验。虽然黑白 LCD 屏可以用作实时掩模,但是考虑到实用性,实验中采用彩色 LCD 屏。具有扭曲排列的向列相畸变分子的彩色 LCD 结构如图 7 所示。它由 2 个玻璃平面和电镀在 2 个玻璃内平面上的透明电极组成,在 2 个玻璃平面之间是各向异性的扭曲排列的向列相畸变模式的液晶材料,在共同电极下是能滤三原色(红、绿、蓝)光的滤光器。一个像素是由一组红光、绿光、蓝光所组成,三原色光的光谱如图 8 所示。分光器和偏振轴平行于 x 轴的起偏镜被置于玻璃平面的外侧。扭曲排列的向列相畸变分子的排列模型

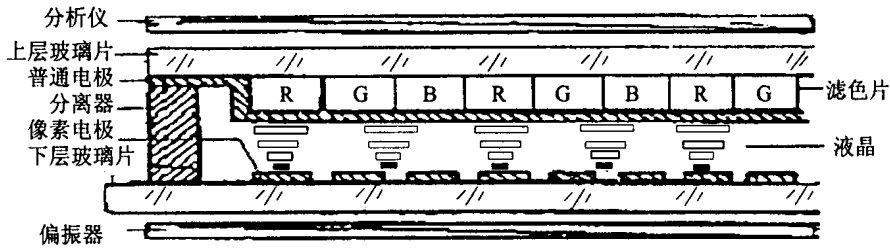


图 7 液晶显示器的结构示意图

如图 9 所示。沿着 z 轴的自然光通过起振器被改变成线性的偏振光。通过液晶层传播的光的偏振态取决于像素电极和共同电极之间的电场。当电场为零时,光不能通过分光器传播,而当电场高于确定的阈值时,光能够通过分光器传播。由于明胶对可见光敏感并且不需要紫外线的曝光光源,所以选择它作为光敏层的材料,其敏感的光谱范围为 $400 \sim 680\text{nm}$ 。明胶早已用于制作微光学元件。

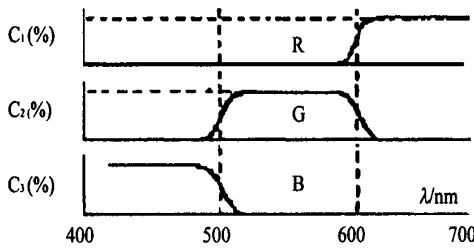


图 8 彩色 LCD 的光谱曲线

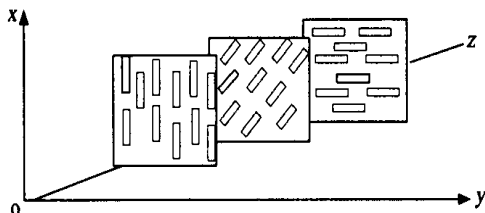


图 9 LCD 中扭曲排列的向列相畸变分子的排列模型

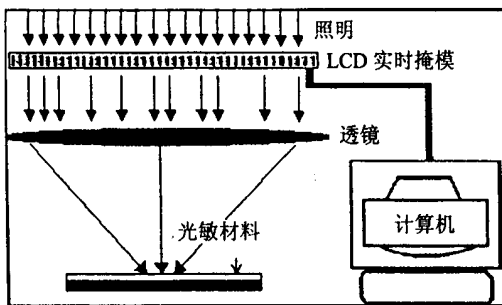


图 10 LCD 掩模制版的实验系统

LCD 掩模光刻法的实验系统如图 10 所示。计算机使用一个视频图像卡控制 LCD,对所有的掩模图像进行了计算并存储在计算机中,然后 LCD 掩模图像被缩小并投影在感光材料的表面上。虽然感光银盐明胶片的制造工艺已经成形,但为了更好地使其应用,已经研究了一种最优化

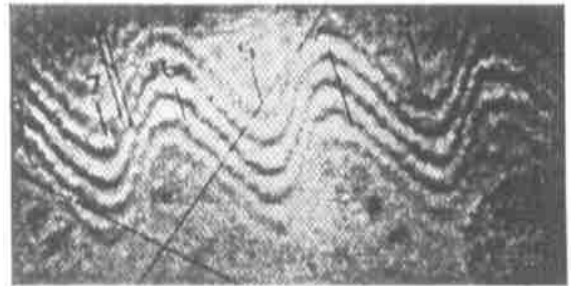


图 11 干涉显微镜下锯齿形光栅的干涉图像

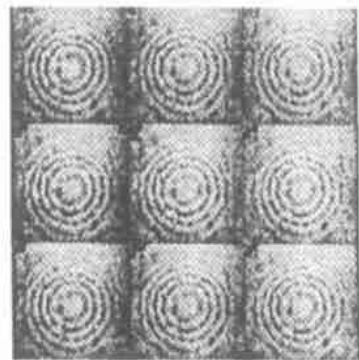


图 12 干涉显微镜下轴锥体的干涉图像

过程。步骤如下所示：

- (1) 曝光 90s;
- (2) 20 下,在柯达公司的 D-19 溶液中显影 2min;
- (3) 20 下,用自来水冲洗 1min;
- (4) 20 下,在改良的 R-10 溶液中漂白 3min,然后用自来水冲洗 1min;
- (5) 20 下,在柯达公司的 S-13 B 溶液中清

洗 1min;

- (6) 在 F-5 的定影溶液中浸泡 4min,然后在 20 下,用自来水和去离子水冲洗 5min;
- (7) 在 35 下,在胰蛋白酶溶液(2%)中蚀刻 5~15min,然后在 20 下,用自来水和去离子水冲洗 5min;
- (8) 在 40 的真空房间中晾干。

制作出的锯齿形光栅的节距为 $46.26\mu\text{m}$,蚀刻深度为 $0.902\mu\text{m}$;轴锥体的直径为 $118.7\mu\text{m}$,蚀刻深度为 $1.332\mu\text{m}$ 。锯齿形光栅和微型轴锥体的干涉图像如图 11 和图 12 所示,其三维结构的实测图可用针式仿形装置绘制。

5 结 论

本文论证了一种用 LCD 屏作为掩模制作任意形状微结构的新技术。通过计算机控制,一块

单一的 LCD 屏能够显示一系列的掩模图像和完成一系列的光刻,而在传统的光刻法中必须使用一系列的掩模来实现。为了使感光层上的三维形状更加清晰,将其高度分割成若干阶,每阶对应一个等高面,而每一个等高面就是一个通过 LCD 显示的掩模,其曝光剂量由照明时间来控制。目前采用该技术已成功地制作出轴锥体和锯齿形光栅等微光学元件。由于这种光刻法不需要掩模,且三维轮廓可通过单步光刻成像,因此是一种经济快捷的技术。目前可以在可见光下完成光刻。如果紫外线透明的 LCD 屏是可行的,那么也可以使用紫外线光源。这种技术最适于蚀刻微光学元件,但由于自身特性,图像的分辨率仍受限于 LCD 屏像素的最小尺寸。(No. 3)

王旭智 编译

用于海陆空目标分析的 SATIR 多光谱红外系统

CEDIP 红外系统公司向法国 Cazeaux 空军基地提供了一种新型 SATIR 多光谱红外分析系统。

SATIR 系统可用于搜集 3 个主要红外波段($1\sim 2.5\mu\text{m}$, $3\sim 5\mu\text{m}$ 和 $8\sim 12\mu\text{m}$)的飞机、直升飞机和导弹的红外特征波形。其先进的摄像机设计使操作员能够收集并存储每一个红外波段的实时序列图像以便于后处理。

每部摄像机均配置一个 600mm 透镜,因此能提供 $< 1^\circ$ 的非常窄的视野。SATIR 系统采用流行的 JADE 摄像机作为主要传感器,并为之配置了实时图像处理和存储工作台。

CEDIP 红外系统公司是一家专门设计并制造红外分析和温度测量的红外系统的公司。(www.cedip-infrared.com)