

# 数字掩模灰度细分技术研究

陈劲松

(安徽财经大学电子信息工程系,安徽 蚌埠 233000)

**摘要:**数字掩模技术是一种很有发展前途的衍射微光学元件制作技术。实际制作时,由于感光材料具有感光非线性,实际可利用的灰度数目将小于256。即使256级灰度全部可用,也无法实现曝光量的精细控制以达到一般的加工要求。文中提出了2种灰度细分的方法,即多SLM组合调制和彩色等效灰度技术。从理论上分析了2种方法均能实现灰度的细分,从而达到曝光量的精细控制。

**关键词:**数字掩模;空间光调制器;灰度细分

**中图分类号:**TN249      **文献标识码:**A

## Research on gray subdivision technology of digital mask

CHEN Jin-song

(Electronic Information Engineering Department of Anhui University of Finance & Economics, Bengbu, 233041, China)

**Abstract:** Digital mask technology is a method with good prospect that manufacture diffractive optical element. While diffractive optical element is made, the number of gray level that can be used will be less than 256 due to sensitive nonlinearity of photosensitive material. Even if 256 gray grades can be used entirely, fine control that obtains general processing demand will not be realized. In the paper, two methods of gray subdivision and expansion are put forward. They are assembled modulation by many SLMs and color-equivalent-gray technology. It is analyzed theoretically that two methods both can realize gray subdivision, which can result in elaborate control of light exposure.

**Key words:** digital mask; spatial light modulator; gray subdivision

### 1 引言

衍射微光学元件(diffraction optical element, DOE)使得光学器件微型化、阵列化和集成化成为可能。目前,国内外对DOE的制作技术研究相对滞后于设计理论,限制了DOE的发展和應用。总结起来,DOE制作技术主要有:二元光学技术、直写技术和灰度掩模技术<sup>[1]</sup>。其中,灰度掩模技术最有发展前途,其关键是制作一张高精度的灰度掩模板,以实现曝光量的精细控制。数字掩模技术是在传统的灰度掩模技术基础上发展起来的,其核心器件是空间光调制器(spatial light modulator, SLM)。由于SLM输出的光场信息是受计算机输出的二进制数字掩模控制的,故取名为数字掩模技术。由于在整个曝光

过程中没有真实存在的灰度掩模板,所以又称为虚拟掩模技术。

制作衍射微光学元件的感光材料大部分具有感光非线性,实际所能够利用的灰度(即线性区)等级远小于256。即使256灰度等级全部可用,也无法满足一般的制作误差要求。为了能精确地控制曝光量,必须采用一定的方法来实现灰度的细分,从而大大增加可利用等效灰度的数目。文中提出了2种解决的措施,分别是多SLM组合调制技术和彩色等效

**作者简介:**陈劲松(1975-),男,硕士,现为安徽财经大学电子信息工程系教师,主要研究方向为衍射微光学,虚拟仪器,移动GIS等。E-mail: cjslaser2001@126.com

**收稿日期:**2010-12-22; **修订日期:**2011-03-03

灰度技术,从理论上分析了两种方法实现灰度细分的可行性,对衍射微光学元件或高精度灰度掩模板的制作均具有重要的参考价值。

## 2 数字掩模技术原理

图 1 是数字掩模技术实现原理图<sup>[2]</sup>。图中采用的 SLM 为数字微镜 (digital micro-mirror device, DMD),也可以替换为硅基液晶 (liquid crystal on silicon, LCOS)。DMD 和 LCOS 均为反射式 SLM,在设计系统光路时,一般要将光源经过多个反射镜的反射再以一定的入射角射到 DMD 芯片上,光路较复杂。而如果采用液晶 (liquid crystal display, LCD) 作为系统中的 SLM,则光路设计要简单的多,因为 LCD 为透射式 SLM。但由于 DMD 具有比 LCD 更高的开口率、较快的响应速度和较宽的带宽<sup>[3]</sup>,在数字掩模应用领域具有更好的发展前景。

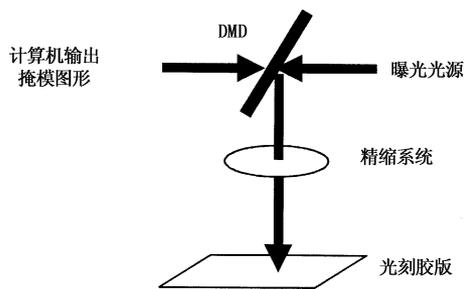


图 1 数字掩模技术实现原理图

数字掩模技术实现原理可简述如下:计算机输出的二进制数字掩模信息控制 SLM 的输出,实现对曝光光源(强度均匀分布的平行光束)的调制。因此从 SLM 输出的光场分布就是掩模信息,这种掩模信息存在于空间且在空间自由传播,入射到高倍精缩投影系统,经过缩微后在涂有光刻胶的基板上成像。后续经过显影蚀刻即可得到所需要的衍射微光学元件。

## 3 灰度细分的必要性

制作 DOE 一般选择光刻胶来完成浮雕图形的传递,而光刻胶具有感光非线性。若选择正性光刻胶,如国产型号 BP213,掩模图形灰度值越大的地方,光透过率越大,曝光深度也越大。为了使台阶具有线性等高分步,要求曝光区落在感光曲线的线性区。图 2 是正性光刻胶的感光曲线图。 $D_1$  左侧包含非线性区和微量曝光不响应的截止区, $D_2$  右侧包含非线性区和过量曝光不响应的饱和区, $D_1 - D_2$  之间为线性区。

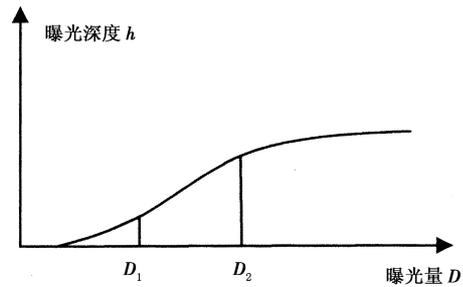


图 2 光刻胶感光曲线

解决感光非线性问题可通过预曝光解决<sup>[4]</sup>。在制作台阶数不多的 DOE 时,可通过这种方法使曝光区落在线性区,此时线性区所对应的灰度等级能够满足曝光深度的精细控制。但制作多台阶如 16 台阶、32 台阶、64 台阶,甚至连续 DOE 时,感光线性区所对应的灰度数目将不能满足曝光量的精细控制。下面以制作八台阶 DOE 为例定量计算。

假设线性曝光,设最大曝光深度为  $D$  ( $\mu\text{m}$ ),对应最大曝光量设为  $P$  ( $\text{mJ}$ )。根据线性等高要求,每个台阶高度为  $D/8$  ( $\mu\text{m}$ )。设线性区对应灰度级为 256 (实际小于 256),则分辨率为  $P/256$  ( $\text{mJ}$ )/灰度。为满足一般加工要求,深度误差不大于 2%<sup>[5]</sup>,设曝光量精细控制分辨率为  $x$  ( $\text{mJ}$ ),则:

$$\frac{P}{D} = \frac{x}{\frac{D}{8} \times 2\%}$$

$$x = P/400 \text{ (mJ)}$$

经分析,制作八台阶衍射微光学元件时,为满足最大 2% 的制作误差,要求曝光量的精细控制为  $P/400$  ( $\text{mJ}$ ),而 256 级的灰度等级分辨率为  $(P/256 \text{ mJ})/\text{灰度}$ ,无法实现曝光量的精细控制。当台阶数目进一步增多时,矛盾更加突出。因此,为了实现曝光量的精细控制,必须进行灰度细分。所谓灰度的细分,就是在相邻两个灰度值之间,插入多个等效的灰度值,使其对应的光透过率介于相邻两个灰度值对应的光透过率之间。

## 4 多 SLM 组合调制技术

为简单起见,以 2 个 SLM 为例说明多 SLM 组合调制以实现曝光量精细控制的原理。图 3 是 2 个 SLM 实现组合调制的原理图。设曝光光源光强为  $I_0$ ,分光镜分光比为  $m_1:m_2$ ,入射到 SLM<sub>1</sub> 的光强为  $I_{10}$ ,入射到 SLM<sub>2</sub> 的光强为  $I_{20}$ 。则:

$$I_{10} = \frac{m_1 I_0}{m_1 + m_2}$$

$$I_{20} = \frac{m_2 I_0}{m_1 + m_2}$$

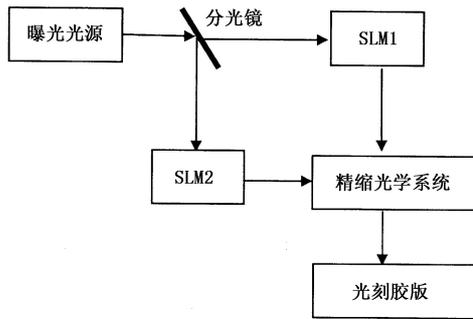


图3 2 SLM 组合调制原理图

设 2 个 SLM 对应像素的灰度值分别为  $g_1$  和  $g_2$ , 则 SLM<sub>1</sub> 输出光强为:

$$I_1 = \frac{g_1 I_{10}}{256} = \frac{g_1 m_1 I_0}{256(m_1 + m_2)}$$

SLM<sub>2</sub> 输出光强为:

$$I_2 = \frac{g_2 I_{20}}{256} = \frac{g_2 m_2 I_0}{256(m_1 + m_2)}$$

则合成后的总光强为:

$$I = I_1 + I_2 = \frac{(g_1 m_1 + g_2 m_2) I_0}{256(m_1 + m_2)}$$

设  $g_1 = 1, g_2 = 0$ , 则光强的灰度调制分辨率为  $m_1 I_0 / 256(m_1 + m_2)$ , 而单个 SLM 的 256 级灰度调制分辨率为  $I_0 / 256$ , 通过调整不同的分光比, 可得到不同的灰度调制分辨率。表 1 是不同分光比得到的灰度调制分辨率和等效的灰度数目。从表中可以看出, 随着分光比的增大, 2 个 SLM 组合实现的调制大大增加了等效的灰度数目, 从而实现曝光量的精细控制。

表 1 不同分光比对应的灰度调制分辨率和等效的灰度数目

分光比 ( $m_1:m_2$ )	灰度调制分辨率	等效的灰度数目
1:1	$I_0/512$	512
1:2	$I_0/768$	768
1:3	$I_0/1024$	1024
1:5	$I_0/1536$	1536
1:8	$I_0/2304$	2304

### 5 彩色等效灰度技术

最早使用彩色等效灰度思想的是美国麻省理工学院的研究人员<sup>[6]</sup>。他们采用高分辨率的彩色打印机在透明片上制作八彩色掩模图, 然后将彩色图形转印到黑白胶片上, 从而形成八个灰度掩模图形。利用胶片实现曝光量的控制, 在光刻胶上形成八个不同的曝光深度, 经显影和刻蚀产生八台阶衍射微光学器件。这种制作灰度掩模技术的缺点是打印机

色彩太少, 且色彩所等效的灰度与台阶高度为非线性关系, 但这种采用彩色等效灰度原理的技术, 为制作高分辨率和高精度的灰度掩模提供了一种切实可行的方案。关键问题之一是进一步提高打印机(或彩色图片输出设备)的色彩等级, 这一点已基本不成问题, 如 PP8000 型胶片输出仪色彩十分丰富, 24 位 RGB 值控制 1680 万真彩色输出, 数字掩模系统中的 SLM(LCD, DMD, LCOS) 均能实现 24 位真彩色输出, 已广泛应用于投影机领域; 二是建立彩色等效灰度机制, 如何选择合适的彩色, 对应更多可利用的等效灰度, 即实现灰度细分。

自然界中的颜色是通过 R, G, B 三基色通过不同的组合得到。选择不同的三基色系数, 可得到不同的颜色。经过实验测试, 不同的颜色组合可得到相同的光透过率, 即对应相同的灰度, 因此彩色与灰度之间是多对一的映射关系。因此彩色等效灰度的机理相当复杂, 有待于进一步研究。接下来提出一种切实可行但比较笨拙的方法, 即查表法。实际制作掩模之前, 可预先通过大量的实验测试建立一张不同彩色组合与光透过率之间关系的表格, 该表格中的光透过率要求呈一定的线性增长, 对应一定线性变化的台阶高度。制作多台阶衍射微光学元件时, 可采用查表法, 根据台阶高度选择光透过率, 进一步选择某一 RGB 组合。图 4 是测试光透过率的简单光路图。计算机输出数字化彩色掩模图形, 控制 SLM 输出实现对入射光的调制, 激光功率测试器测量 SLM 输出光的功率。假设曝光光源功率为  $P_1$ , SLM 输出功率为  $P_2$ 。则光透过率为:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \times 100\%$$

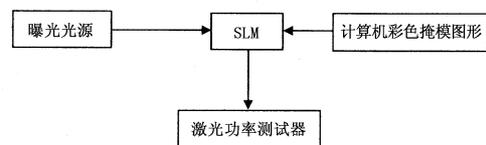


图4 光透过率测试光路图

每次测试的彩色掩模图形通过计算机显卡全屏输出。绘制时采用颜色自定义模式, 可先固定二种基色的系数, 按一定间隔变化第三种基色的系数。由于色彩的多样性, 所等效的灰度等级远大于 256, 相当于在两个相邻灰度之间插入了许多更加细分的等效灰度。

采用查表法实现灰度细分的缺点是, 当曝光光源变化时, 需要重新测试, 建立一张新的彩色与透过率之间关系的表格。

## 6 结 论

数字掩模技术目前还处于研究阶段,有许多相关技术未得到解决,如彩色等效灰度的机理。而DMD芯片的开发系统电路板已经产业化,采用多DMD实现组合调制无疑是比较好的选择。如果SLM的灰度等级由现在的8位变成12位或更高,则无需组合即可实现曝光量的精细控制。相信在不久的将来,数字掩模技术一定会逐步产业化,为大批量制作衍射微光学元件或高精度灰度掩模板开辟一条新的道路。

### 参考文献:

- [1] Li Hongjun, Li Fengyou, Yu Limin, et al. Gray mask technology[J]. *Microfabrication Technology*, 2000, 1: 10 - 15. (in Chinese)  
李红军, 李凤友, 于利民, 等. 灰度掩模技术[J]. *微细加工技术*, 2000, 1: 10 - 15.
- [2] Chen Jinsong. Research on high quality reduction projecting system based on digital micromirror device[J]. *Laser & Infrared*, 2006, 36(3): 206 - 209. (in Chinese)  
陈劲松. 基于数字微镜的高质量精缩投影光刻系统的研制[J]. *激光与红外*, 2006, 36(3): 206 - 209.
- [3] Kevin J. Kearney and Zoran Ninkov, Characterization of a digital micromirror device for use as an optical mask in imaging and spectroscopy [C]. SPIE, 2002, 3292: 81 - 92.
- [4] Yang Guoguang, et al. *Micro-optics and system*[M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2008. (in Chinese)  
杨国光, 等. *微光学与系统*[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2008.
- [5] Xu Ping, Zhang Xiaochun, Hang Yongkang, et al. Error analysis and simulation of binary optics device fabrication [J]. *Acta Optica Sinica*, 1996, 16(6): 833 - 838. (in Chinese)  
徐平, 张晓春, 韩永康, 等. 二元光学元件制作误差分析与模拟[J]. *光学学报*, 1996, 16(6): 833 - 838.
- [6] V E Shrauger, L L Erwin, J L Ahn, et al. Computer-generated multiple-phase-level holograms by use of color-printer techniques [J]. *App. Opt.*, 1994, 33(23): 5318 - 5327.