

# 基于数字微反射镜灰度光刻的成像模型\*

郭小伟<sup>1</sup> 杜惊雷<sup>1,\*\*</sup> 罗铂靛<sup>1</sup> 郭永康<sup>1</sup> 杜春雷<sup>2</sup>

(1 四川大学物理学院, 成都 610064)

(2 中国科学院光电技术研究所, 成都 610209)

**摘 要** 在深入探讨 DMD(Digital Mirror Device) 灰度图形传递的特点基础上, 把曝光量分布作为分析数字光刻成像的物理量, 建立了数字灰度光刻的成像模型. 以制作微米量级微透镜为例, 通过模拟分析, 讨论了数字光刻过程中 DMD 的工作方式、成像系统参量对抗蚀剂曝光量分布的影响, 揭示了数字灰度光刻成像机理, 为开展数字光刻实验研究提供了理论根据.

**关键词** 数字灰度光刻; DMD; 成像模型; 曝光量

**中图分类号** TN305 **文献标识码** A

## 0 引言

光学光刻是通过曝光、显影、刻蚀等工艺把记录在掩模上的设计图形传递到基片上的一种微加工技术. 在光刻过程中, 由于掩模制作工艺复杂、所需设备贵重, 尤其是随着光刻系统分辨率提高需要高精度、高质量的掩模导致了其成本大幅增加, 因此可加工高质量掩模或直接用于 IC 加工的无掩模光刻技术受到人们的关注. 目前, 已有的电子束直写、激光直写等无掩模光刻技术大多生产效率不高<sup>[1~4]</sup>. 近年来出现了以空间光调制器为图形发生器的数字光刻技术<sup>[5,6]</sup>, 特别是美国德州仪器公司基于 DLP(Digital Light Processing) 技术的 DMD, 其具有高分辨率、高亮度、高对比度、高可靠性、数字控制、响应时间短等优点, 有望成为下一代无掩模光刻系统的一种理想图形发生器. 目前这一技术在国际上仍处于探索研究阶段, 研制高分辨率数字光刻设备尚需对数字光刻成像理论、快速精确的数字图形优化算法、数据传输以及波前工程等方面的问题做深入探讨和研究.

由于 DMD 可以产生灰度图形, 因此也可以用来制作连续表面型微结构<sup>[7,8]</sup>, 其具有常规灰度光刻一次成型的特点, 同时具有动态控制灰度图形实现特殊面形需求的优势<sup>[9]</sup>. 数字光处理技术的灰度图形是通过微反射镜开合的时间脉冲调制来实现, 因此基于 DLP 灰度图形技术的投影曝光过程不能简单地按已有投影光刻成像公式计算. 本文分析了 DMD 灰度图形的特点, 基于部分相干光成像理论, 提出用曝光量作为分析光刻成像的物理量, 建立了适于描述数字灰

度光刻的成像模型, 编制了成像过程计算仿真程序, 开展了数字灰度光刻成像模拟研究.

## 1 DMD 产生灰度图形的原理

### 1.1 DMD 光开关原理

美国德州仪器公司生产的 DMD 主要由微镜片、驱动电路和随机存储器构成. 目前投影显示系统上常用的 DMD 每个微镜单元是  $16\ \mu\text{m} \times 16\ \mu\text{m}$  方形, 相邻的镜片中心有  $17\ \mu\text{m}$  的间距. DMD 工作时, 把常规的图形信息转换为二进制数字控制信号载入随机存储器中, 通过驱动电路驱使微镜片上下偏转  $10^\circ$  角, 如图 1. 从图中可以看出每一单元都有 3 个稳态: 无控制电压信号时微镜不偏转对应  $0^\circ$ ; 当控制信号处于对应于二进制的“1”和“0”的两种电压状态时, 微镜分别偏转  $+10^\circ$  和  $-10^\circ$ , 屏幕上相应像素点呈亮和暗两种状态. 当微镜片偏转运动到达  $10^\circ$  或  $-10^\circ$  后, 由于机械结构的限制和控制电压序列的作用, 最终将稳定在该位置直到下一个电压序

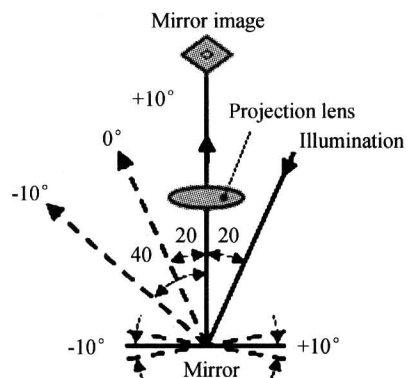


图 1 DMD 光开关原理  
Fig. 1 DMD optical switching principle

列到来. 微镜片可在两种状态间的高速转换, 其转换速度可达  $\mu\text{s}$  量级.

### 1.2 DLP 实现灰度等级技术

由于数字微镜是一种反射式显示器件, 其镜面

\*国家自然科学基金(60376021)和微细加工国家重点实验基金资助

\*\* Tel: 028-85412983 Email: dujinglei@tom.com

收稿日期: 2005-06-02

的反射只有亮和暗两种状态,因此微反射镜设备显示灰度图像时,只能通过数字控制信号的脉冲宽度来调整每个镜片反光时间的长短得到相应灰度等级,其被称为二进制时间脉宽调制(见图 2)<sup>[10]</sup>.

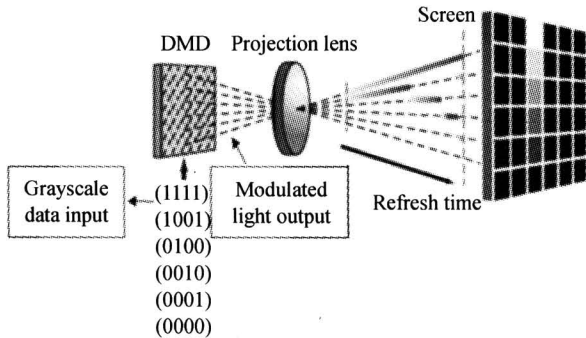


图 2 DMD 的时间脉冲宽度调制原理(以 4 bit 为例)  
Fig. 2 Binary pulse width modulation (4 bit example)

图 2 是常见的 DMD 投影显示系统在屏幕上产生灰度图形的示意图,中间一列微镜有输入信号控制,并通过控制数字信号实现像面量化深度为 4bit 灰度(24=16 种灰度等级).银幕上端为白色亮点,下端为黑色暗点,中间为灰色过度点.其中输入数字脉冲信号的每一位表示微镜反光开启或关断的时间间隔,其时间间隔相应的权重值为  $2^0, 2^1, 2^2, 2^3$  或 1, 2, 4, 8, 最短的时间间隔称为最低有效位.这里用数字脉冲信号 1111 驱动反射镜片 +10° 偏转,将信号光反射到银幕上的时间较长,人眼感觉为白色亮点;数字脉冲信号 0000 驱动反射镜片 -10° 偏转,微反射镜片将光线反射至吸收器吸收,因此银幕上看到的是暗点.数字 0100 等脉冲信号驱动反射镜片在 +10° 和 -10° 间偏转,银幕上呈现为灰色点.图中银幕与镜头之间灰色线条的长短表示光脉冲的持续时间宽度.对于数字光刻成像系统而言,其灰度成像过程类似,但屏幕换成了抗蚀剂,光脉冲的持续时间宽度则对应不同的曝光量,抗蚀剂显影后将得到连续的浮雕轮廓.

## 2 数字灰度光刻成像模型

对 DMD 特性的分析知,在不同的比特位时间段内到达像面上的光强是不同的,即像面光强分布是时间的函数,因此不能简单地按已有投影光刻成像公式分析空间像质量.为准确分析抗蚀剂的曝光情况,应考虑 DMD 产生的多个瞬态图形成像光强的时间累积效应,把曝光量分布作为分析基于 DMD 数字光刻成像的物理量.

### 2.1 模型的数学表达

首先将一个设计曝光量分布量化成灰度图形分布  $f(x, y)$ , 并设其灰阶数为  $N$ , 总曝光时间为  $t_{\text{total}}$ ,

则每幅灰度图形在 DMD 显示时都可以分为  $n = \log_2 N$  个比特位时间段.由于脉冲信号是二值化的,因此在每个比特位时间段内 DMD 显示的实际是一幅二值化黑白图形.这样灰度图形就转化成  $n$  幅二值图形,并按一定规律循环曝光.  $f(x, y)$  可表示为

$$f(x, y) = \sum_{i=1}^n 2^{i-1} \cdot b_i(x, y) \quad (1)$$

式中  $b_i(x, y)$  为第  $i$  个比特位时间段内 DMD 显示的二值图.最短的等效曝光时间(应系最低有效位所用时间的整数倍)为

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

第一幅二值图  $b_1(x, y)$  等效曝光时间为  $\Delta t_1 = t_0$ , 第二幅为  $\Delta t_2 = 2 \times t_0, \dots$ , 第  $n$  幅  $b_n(x, y)$  等效曝光时间为  $\Delta t_n = 2^{n-1} \times t_0$ .

由于光刻中的物面照明是部分相干照明,根据部分相干光理论和霍布金斯有效光源的概念,并考虑到 DMD 投影成像的特殊性,则  $\Delta t_i$  段内像面的光强分布公式应表述为<sup>[11]</sup>

$$\Delta I_i(x_i, y_i) = \iint_{\sigma} I_{\text{eff}}(x_s, y_s) | \iint U(f_x, f_y, \Delta t_i) \cdot H(x_s - f_x, y_s - f_y) \exp [j2\pi(f_x x_i + f_y y_i)] \cdot df_x df_y |^2 dx_s dy_s \quad (3)$$

式中  $I_{\text{eff}}(x_s, y_s)$  代表有效光源的光强,  $H(x_s - f_x, y_s - f_y)$  是光瞳函数,  $U(f_x, f_y, \Delta t_i)$  是  $\Delta t_i$  时间段内物频谱.则在  $\Delta t_i$  段内的曝光量为

$$\Delta E_i(x_i, y_i) = \Delta I_i(x_i, y_i) \Delta t_i \quad (4)$$

抗蚀剂上总的曝光量为不同的时间段曝光量累加

$$E(x_i, y_i) = \sum_{i=1}^n \Delta E_i(x_i, y_i) \quad (5)$$

把式(3)~(5)合并可以得出

$$E(x_i, y_i) = \sum_{i=1}^n 2^{i-1} \cdot \Delta I_i(x_i, y_i) \cdot t_0 \quad (6)$$

根据式(6)就可以计算抗蚀剂表面上的曝光量分布.

### 2.2 模型讨论

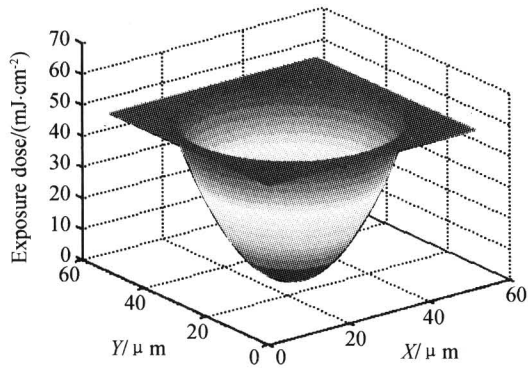
当阶数  $N=2$  时,  $n=1$ , 只有一个比特位时间段,相当于曝光图形是黑白二值图形,即模型描述的是常规投影光刻成像过程;当阶数  $N>2$  时,  $n>1$ , 意味着曝光图形有很多灰阶,此时该模型给出 DMD 数字灰度光刻的曝光量分布.其它类似空间光调制器作为图形发生器的光刻系统也适用于此成像模型.

## 3 数字光刻成像模拟

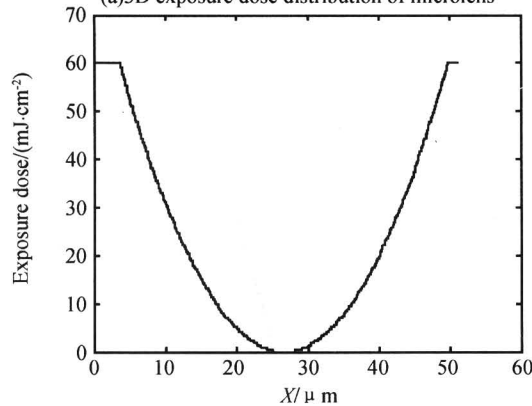
下面用数字光刻成像模型计算制作微透镜的曝光量分布,进一步揭示 DMD 投影成像机理并分析成像系统参量的影响.模拟条件如下:

曝光源为  $I$  线, 波长  $\lambda$  为  $0.365 \mu\text{m}$ , 光源的部分相干因子  $\sigma$  为 0.5, 成像系统的缩小倍率为 20;

微透镜为曲率半径为 500 μm,透镜的矢高 10 μm 的球冠;设计的图形如图 3.



(a)3D exposure dose distribution of microlens



(b)The cross section of microlens

图 3 设计的微透镜  
Fig. 3 Designed microlens

若抗蚀剂为 AZ9260 正性胶,当使用 AZ303A 显影液,在一定条件下曝光量与显影浮雕深度近似

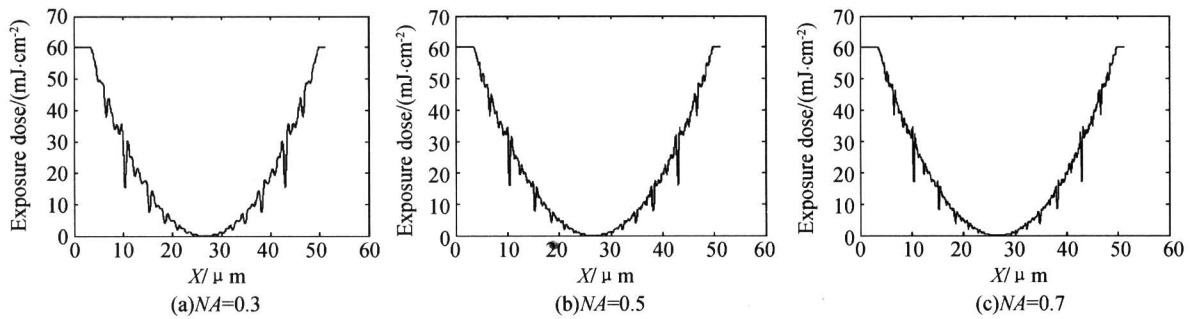


图 5 NA 分别是 0.3、0.5 和 0.7 时的中间位置曝光量剖面图  
Fig. 5 The middle sections of exposure dose with different NA

为定量分析实际曝光量与设计曝光量间的偏差,引入曝光量偏差因子

$$\Delta E = \frac{\sum_i^n |dose(x_i, y_i) - dose_{desired}(x_i, y_i)|}{\sum_i^n dose_{desired}(x_i, y_i)} \quad (7)$$

式中  $n$  为曝光区域离散分析的抽样点数,  $dose(x_i, y_i)$  为第  $i$  点附近的模拟曝光量,  $dose_{desired}(x_i, y_i)$  为该点处理想曝光量. 引入曝光量偏差因子有助于总体分析 DMD 结构和工作方式、成像系统参量等诸因素对到达抗蚀剂上的曝光量分布的影响.

呈线性关系<sup>[12]</sup>,满足上述微透镜制作要求.

设曝光图形的灰阶数  $N=256$ ,总曝光时间  $t=60s$ ,则  $n=8$ . 灰度图形分解为 8 个黑白二值图形(见图 4).

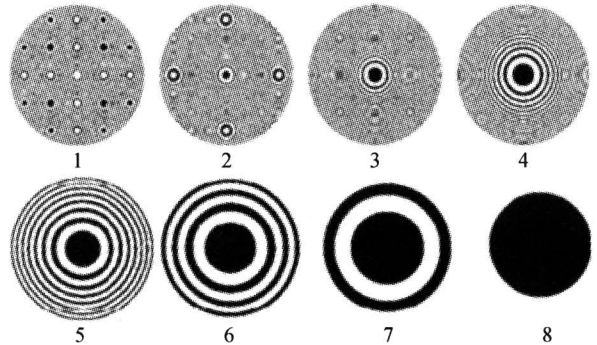


图 4 灰度图形分解成 8 幅黑白二值图形(第 1 幅图中间有一暗点)

Fig. 4 Gray-level pattern is broken down into 8 sheets of binary image

图 5(a)、(b)、(c)给出了系统数值孔径为 0.3、0.5 和 0.7 时模拟的微透镜曝光量分布曲线. 可以看出曝光量分布曲线出现振荡起伏,并且中间出现的波谷最大,这是由 DMD 的工作方式引起的. 从图 3 可以看出,实际上这些二值图是一系列周期不同的圆光栅,且它们得到的曝光时间是不同的,通过部分相干成像系统后产生较强的干涉,从而引起表面的波动. 对数字灰度光刻制作微光学结构来说,由于像面光强的时间累积效应,因此若曝光量分布的偏差较大时,则需通过预优化设计曝光量方法予以校正.

计算了系统的数值孔径  $NA < 1.0$  时照在抗蚀剂上曝光量偏差,见图 6. 从图可以看到在整个计算范围内,曝光量偏差都小于 5%,并且随着  $NA$  的增大,曝光量偏差也在降低. 当在  $NA < 0.5$  时,曝光量偏差相对较大,主要由于成像过程衍射受限导致高频丢失较严重,这一点也可从图 5(a)、(b)、(c)比较得出.  $NA$  在 0.5~0.8 之间时,曝光量偏差曲线相对平坦,即曝光量偏差较小,约在 2% 以下. 当  $NA$  大于 0.8 时,曝光量偏差略有上升趋势,分析可知,这是由于成像系统的数值孔径加大,使 DMD 结

构及其工作方式的影响逐渐显现. 综合来看, 用 DMD 成像系统容易在抗蚀剂表面上获得较接近设计的理想曝光量, 这说明数字灰度光刻成像系统适合作为加工连续面型微光学结构的快速工具.

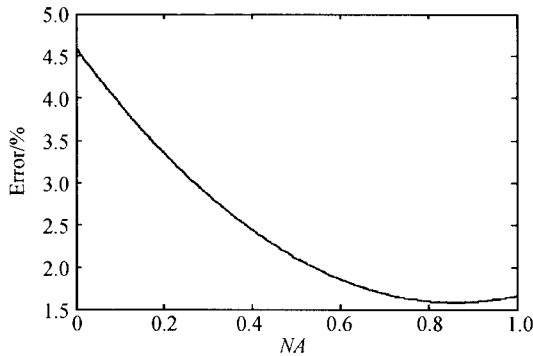


图 6 成像系统的数值孔径对曝光量影响

Fig. 6 The effect of NA on exposure dose

## 4 结论

数字光刻技术在微结构制造等方面已有了初步应用报道, 并显示了其方便、快捷的优点. 数字灰度光刻成像模型的建立, 有助于分析其灰度图形传递特点, 为设计优化曝光图形及实际加工制作微器件的实验参量提供了依据, 并可节约光刻实验成本和时间. 本文深入探讨了 DMD 的工作方式及灰度图形在成像过程中传递机理, 对数字光刻技术的进一步发展和研究有重要的指导意义.

### 参考文献

- 1 卢维美. 电子束纳米加工技术研究现状. 微细加工技术, 1998, **2**(2):1~9  
Lu W M. *Micro-fabrication Technology*, 1998, **2**(2):1~9
- 2 李凤有, 谢永军, 孙强, 等. 激光直写光刻中线条轮廓的分析. 光子学报, 2004, **33**(2):136~139  
Li F Y, Xie Y J, Sun Q, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(2):136~139
- 3 杜惊雷, 黄奇忠, 姚军, 等. 激光直写邻近效应的校正. 光学学报, 1999, **19**(7):953~957  
Du J L, Huang Q Z, Yao J, et al. *Acta Optica Sinica*, 1999, **19**(7):953~957
- 4 尹明, 孙晓军. 电子束曝光机大物面强磁透镜的研究. 光子学报, 2004, **33**(4):509~512  
Yin M, Sun X J. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(4):509~512
- 5 彭钦军, 郭永康, 陈波, 等. 液晶实时掩膜技术制作连续微光学元件. 光学学报, 2003, **23**(2):220~224  
Peng Q J, Guo Y K, Chen B, et al. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(2):220~224
- 6 Kin Foong Chan, Zhiqiang Feng, Ren Yang, et al. Microsyst High-resolution maskless lithography. *J Microlith Microfab*, 2003, **2**(4):331~338
- 7 Lars Erdmann, Arnaud Deparnay, Falk Wirth, et al. MEMS based lithography for the fabrication of microoptical components. *SPIE*, 2004, **5347**:79~84
- 8 Kearney K J, Ninkov Z. Characterization of a digital micromirror device for use as an optical mask in imaging and spectroscopy. *SPIE*, 1996, **3292**:81~92
- 9 姚军, 粟敬钦, 高福华, 等. 编码灰阶掩模酶蚀明胶法制作折射微透镜阵列. 中国激光, 2001, **28**(7):633~638  
Yao J, Su J Q, Gao F H, et al. *Chinese Journal of Lasers*, 2001, **28**(7):633~638
- 10 邹静娴, 吴荣治. 数字微镜器件. 液晶与显示, 2003, **18**(6):445~449  
Zhou J X, Wu R Z. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2003, **18**(6):445~449
- 11 杜惊雷, 张怡霄, 杨静, 等. 部分相干分数域滤波改善光刻分辨率新方法. 光子学报, 2003, **32**(7):892~895  
Du J L, Zhang Y X, Yang J, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(7):892~895
- 12 董小春, 杜春雷, 潘丽, 等. 微透镜阵列浮雕深度控制的新方法. 光电工程, 2003, **30**(4):1~3  
Dong X C, Du C L, Pan L, et al. *Opto-Electronic Engineering*, 2003, **30**(4):1~3

## Imaging Model for DMD-Based Gray-tone Lithography System

Guo Xiaowei<sup>1</sup>, Du Jinglei<sup>1</sup>, Luo Boliang<sup>1</sup>, Guo Yongkang<sup>1</sup>, Du Chunlei<sup>2</sup>

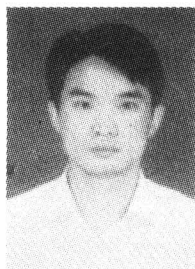
*1 Institute of Information Optics, Sichuan University, Chengdu 610064*

*2 Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209*

Received date: 2005-02-16

**Abstract** The characteristic of the gray-tone pattern generated by DMD is discussed and an imaging model for describing the digital gray-tone lithography process is developed. In addition, the effects of DMD operation mode and the parameters of imaging system to the distribution of the exposure dose on the photoresist are simulated and discussed. The model will be helpful for the experimental research on the digital lithography.

**Keywords** Digital gray-tone lithography; DMD; Imaging model; Exposure dose



**Guo Xiaowei** born in Jiangxi Province. He received his M. S. degree in optics from Sichuan University in 2004. Currently he is a Ph. D. candidate at Department of Physics, Sichuan University. His research interests include holography, holographic recording materials and photo-electronic signal processing.