

一种适用于数字微镜无掩模光刻的图形拼接方法

朱江平^{1,2,3} 胡松¹ 于军胜² 陈铭勇¹ 何渝^{1,3} 刘旗^{1,3}

¹中国科学院光电技术研究所, 四川成都 610209
²电子科技大学光电信息学院, 四川成都 610054
³中国科学院研究生院, 北京 100049

摘要 针对数字投影光刻技术大面积图形曝光的需求,提出了一种基于灰度模板调制的图形拼接方法,包括图形分割、模板设计、子图形灰度调制、子图形曝光 4 个步骤。图形曝光前,需要将曝光图形分割为多帧大小为 1024 pixel×768 pixel 的多个子图形,然后每个子图形与对应模板相乘,实现曝光子图形的预处理。基于数字微镜(DMD)对灰度图形的调制原理,设计了可行的边界灰度调制模板。给出了图形分割的基本方法以及模板设计的原则。计算机仿真实验展示了图形拼接的过程。实验结果表明,该方法能较好地解决大面积图形曝光存在的拼接问题,改善了图形刻蚀的质量。

关键词 图像处理;图形曝光;图形拼接;无掩模光刻;数字微镜;灰度调制

中图分类号 O436.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.0616002

A Graphic Matching Method for Digital Micromirror Device Maskless Photolithography

Zhu Jiangping^{1,2,3} Hu Song¹ Yu Junsheng² Chen Mingyong¹ He Yu^{1,3} Liu Qi^{1,3}

¹Institution of Optics & Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China
²School of Optoelectronic Information, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, Sichuan 610054, China
³Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract For the requirement of large area graphic exposure of digital projection photolithography, a graphic matching method is proposed based on grayscale mask modulation, which includes graphic segment, mask design, sub-graphic grayscale modulation and sub-graphic exposure. Before graphic inscription, the exposure graphics are segmented into many sub-graphics of size 1024 pixel × 768 pixel, then every sub-graphic is multiplied by corresponding mask for the realization of exposure graphics' pretreatment. Feasible edge grayscale masks are designed according to the principle of digital micromirror device (DMD) modulation for grayscale graphic. The basic method of graphic segment and principle of masks design are given in this paper. The computer simulation experiment shows the process of graphics matching. The results show that matching problems in large area graphic inscription can be solved properly using this method. Besides, the quality of graphic inscription using this method is effectively improved.

Key words image processing; graphic exposure; graphic matching; maskless photolithography; digital micromirror device; grayscale modulation

OCIS codes 100.2000; 230.3990; 110.2960; 110.3960

收稿日期: 2012-02-20; 收到修改稿日期: 2012-03-16

基金项目: 国家自然科学基金(60976077, 61076099, 61177032)资助课题。

作者简介: 朱江平(1984—),男,博士研究生,主要从事光刻对准与工艺等方面的研究。E-mail: zsyioe@163.com

导师简介: 胡松(1965—),男,博士,研究员,博士生导师,主要从事微电子总体专用设备方面的研究。

E-mail: husong@ioe.ac.cn

1 引言

微光学元件在通信、军事、空间技术、超精加工以及信息处理等领域中有着广泛的应用,这使得科研人员对微光学相关的设计、制作及应用技术展开了广泛研究。微光学在设计理论与制作方法上已有了很大的发展,为了进一步扩大微光学元件的应用领域,对其制作方法提出了更高的要求。因此,研究便捷、有效、实时、灵活的微光学元件的制作方法仍然是目前国内外微光学领域的一个极为重要的研究方向。基于数字微镜(DMD)的无掩模光刻技术可采用紫外光、深紫外光、甚至更短波长的极紫外光作为光源,具有很强的技术延伸性和工艺兼容性,满足灵活、高效、低成本的要求,更易在光刻实践中得到应用,具有广泛的应用前景。

然而,由于这种光刻技术单次刻蚀的面积有限($1024 \text{ pixel} \times 768 \text{ pixel}$)^[1~3],而且环境干扰、工件台精确定位缺陷等因素对图像的逐场曝光的精确位置造成巨大的影响,从而促成单帧图形拼接线条的错位、包裹、交叠等现象。特别是刻蚀大面积图形,要获得高精度的曝光质量存在很大的技术问题。这就需要图形曝光前通过图形拼接技术对其进行预处理。

为解决上述问题,本文提出了一种基于数字灰度调制的曝光图形预处理方法,旨在解决大面积图形曝光存在的图形拼接问题,实现在拼接处经灰度模板调制的线条对应光刻胶被曝光的程度是渐变的,从而达到图形的拼接,使刻蚀在硅片上的图形形成良好的整体效果。

2 拼接错误现象分析

图1是大面积图形错误拼接存在的几种常见情况示意图。其中,灰色线条表示实际需要曝光的图形,黑色线框内为拼接错误的地方。对于图1(a),由于在 y 方向两次子图形曝光时,工件台定位或其他因素导致横向线条发生错位,纵向线条发生断裂。同样地,图1(b)由于在 x 方向两次子图形曝光时,工件台定位或其他因素导致纵向线条发生错位,横向线条发生断裂。图1(c)中,虽然在 y 方向工件台定位精确,横向线条未发生错位。但是在 x 方向工件台定位存在误差,造成横向线条发生交叠。此处由于曝光过度会使得线条变粗;同样,在 x 方向工件台定位精确,纵向线条未发生错位。但是在 y 方向工件台定位存在误差,造成纵向线条发生交叠。此处

由于曝光过度会使线条变粗。图1(d)是最常见的现象,工件台后在竖直方向连成曝光过度的变粗“带状”结构,这是图形拼接无法接受的,严重影响大面积图形的曝光质量。因此需要设计相应的图形拼接校正算法,消除上述拼接错误现象,使得拼接后的线条连接自然、平滑,且没有明显的截断现象。

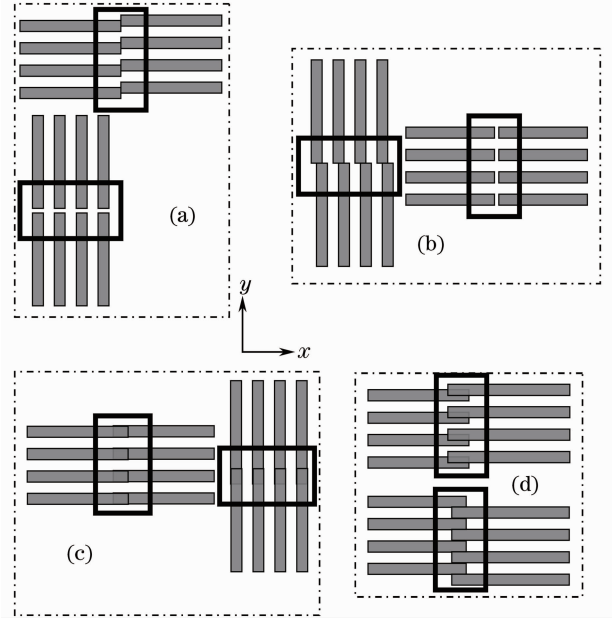


图1 拼接示意图

Fig. 1 Matching schematic

3 图形拼接原理

3.1 DMD 元件的特点

DMD作为数字掩模代替传统掩模,通过其对光的空间调制能力,形成所需要的掩模图案。由 $1024 \text{ pixel} \times 768 \text{ pixel}$ 个微反射镜组成,每个微镜约 $13.68 \mu\text{m} \times 13.68 \mu\text{m}$ 大小(整体尺寸约为 $14.0 \text{ mm} \times 10.5 \text{ mm}$),且每个微镜都可以由计算机控制其开关状态^[1~3]。由于DMD是一种反射式空间光调制器,每个微镜单元偏转时只能有黑和白两种状态,不能产生灰度图形,它是通过转换电路把每一点的灰度数据转换成相应的一进制脉冲电压序列,通过脉冲的宽度来控制反射镜的反光时间,不同的反光时间在像面上对应于不同的曝光量,即所需的灰度级^[1,4]。

3.2 图形分割方法

DMD每次曝光的图形大小为 $1024 \text{ pixel} \times 768 \text{ pixel}$,对于待曝光的图形需要分割大小为 $1024 \text{ pixel} \times 768 \text{ pixel}$ 多个子图形。如图2所示,黑线框为初始曝光图形的边界大小,虚线为分割图形

的边界线。开始分割图像时,从左上角开始(编号1),后续分割的图形,编号2与编号1、编号3与编号1有一部分重叠,重叠部分宽度为 W_{edge} ,后面分割的图形以此类推。如果待曝光的图形不能分割为 $1024 \text{ pixel} \times 768 \text{ pixel}$ 的整数倍,需要在分割前将其扩充为整数倍,填充区域灰度值为0(为便于观察,图2中填充为棋盘格)。其中重叠部分,可以根据需要设定,同时边界填充的区域也会发生相应变化。

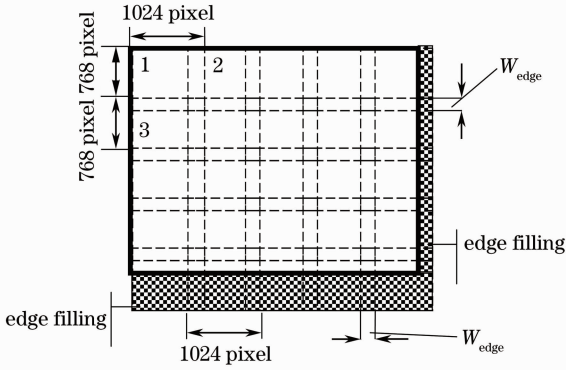


图2 图形分割

Fig. 2 Graphic segment

3.3 模板设计

微反射镜器件显示灰度图像时,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^[5~8]。基于此原理,单帧图形曝光时,如果不同位置点的灰度值不一样,则DMD阵列相应位置的调制状态将发生改变,即DMD的响应状态与图形灰度值一一对应,继而对位置图形曝光在硅片时,光刻胶被刻蚀程度不一样。因此,对不同边界位置拼接的地方,需要设计相应的灰度渐变单帧图形预处理模板^[6]。如图3所示,图中9个虚线框(编号为A11, A12, ...)为图形需要拼接的所有情况,对应9个模板。双线箭头为相邻两帧图形拼接的边界位置,需要设计灰度渐变模板。图3中,虚线框为相邻4帧图形拼接重叠的公共区域。拼接区域灰度渐变的特点在于从单帧图形的内侧到外侧像素点的灰度值依次降低。因此,对于这一区域每个模板的灰度设置有别于2帧图形拼接重叠的区域。两次叠加的部分,灰度最小值与最大值为

$$\begin{cases} G_{\min} = 255 \times k_{\min} \\ G_{\max} = 255 \times k_{\max} \end{cases} \quad (1)$$

如果重叠部分的宽度设置为 W_{edge} ,则两次重叠拼接处模板区域(例如,图3中A11与A12拼接处)的灰度值为

$$G_{\text{mask}}(1:768, j) = \{[255 \times (k_{\min} + k_{\max}) - 255] / (W_{\text{edge}} - 1)\} \times (1024 - j) + 255 \times k_{\min}, \quad (j = 1024 - W_{\text{edge}} + 1 : 1024), \quad (2)$$

式中 k_{\min}, k_{\max} 称之为灰度渐变系数最小值与最大值,其大小与光刻工艺和DMD器件的参数有关。一般满足 $1 \leq k_{\min} + k_{\max} \leq 1.5$ 。

4次拼接叠加的部分,如图3虚线框处区域。对于单帧图形,例如A11。拼接区域(A11右下角)的灰度值表示为

$$G_{\text{mask}}(768 - W_{\text{edge}} + 1, j) = \{[255 \times K_{\min} + 255 \times (K_{\max} - K_{\min})] / (W_{\text{edge}} - 1)\} \times (1024 - j), \quad (j = 1024 - W_{\text{edge}} + 1 : 1024), \quad (3)$$

式中 K_{\min}, K_{\max} 称之为灰度渐变系数最小值与最大值,其大小与光刻工艺和DMD器件的参数有关。一般满足 $0.5 \leq K_{\min} + K_{\max} \leq 1$ 。

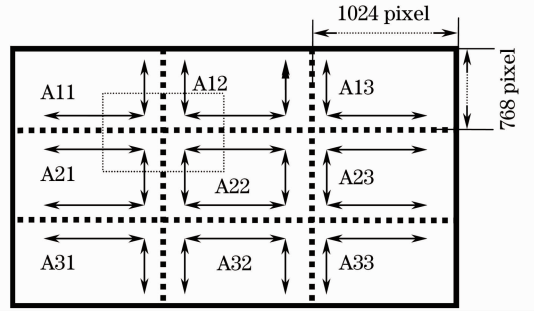


图3 模板设计

Fig. 3 Mask design

4 计算机模拟拼接

4.1 模拟图形分割

为了使上述图形分割方法更加明确化,利用本文提出的方法分割设计好的标准图形,如图4所示。图4(a)是计算机设计的标准分割图形,其大小为 $2872 \text{ pixel} \times 2804 \text{ pixel}$,设定 $W_{\text{edge}} = 100 \text{ pixel}$ 刚好可以分割为9帧大小为 $1024 \text{ pixel} \times 768 \text{ pixel}$ 的子图形。图4(b)、(c)为图4(a)左上角第一、第二帧子图形。图4(b)的右边和图4(c)的左边很明显有一部分重叠。实际曝光前,将第一帧和第二帧图形分别与图3中A11和A12的模板相乘实现灰度调制预处理。曝光时第二帧图形的左边将重叠在第一帧图形的右边,重叠宽度约为 100 pixel ,从而实现步进图形曝光。

4.2 拼接测试

图4(a)分割为9帧子图形后,分别受相应的模



图 4 分割图形。(a)标准图形;(b)第一帧;(c)第二帧

Fig. 4 Segment graphic. (a) Standard graphic; (b) first frame; (c) second frame

板调制,拼接后的结果如图 5 所示。图中可以看出,拼接处的灰度值大于周围其他区域。但对于单帧图形曝光时,拼接边界区域的灰度值是小于其他区域的,此时光刻胶被刻蚀的程度并不是与灰度值成线性关系的。因此,通过本文提出的方法,实际图形曝光拼接结束后,拼接区域的光刻胶被刻蚀的程度与周围其他区域基本相同,不会出现曝光过度的问题,从而实现相邻子图形拼接的平滑、自然过渡。

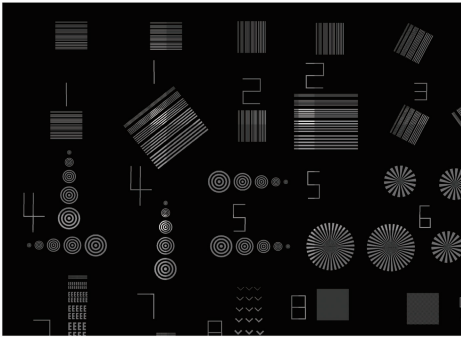


图 5 模拟拼接结果

Fig. 5 Simulation of matching results

5 实 验

5.1 实验装置

如图 6 所示,实验中采用汞灯光源(光源波长 365 nm)平行光照明 DMD,DMD 的 γ 值设置为 7。计算机控制 DMD 产生所需要的曝光图形,经过光刻物镜实现图形在基片上的曝光。其中光刻物镜的缩小成像倍率约为 1/3。首先利用已经编制好的分割程序将待曝光图形分割为多帧 1024 pixel \times 768 pixel 大小的子图形,然后通过计算机控制工件台实现步进逐场自动曝光拼接。

5.2 实验过程与结果分析

受图形发生器尺寸限制,在制作大面积曝光图形时,单场曝光的图形大小有限。同时,为保证图形拼接精度,需要精密位移工件台具有良好的定位精

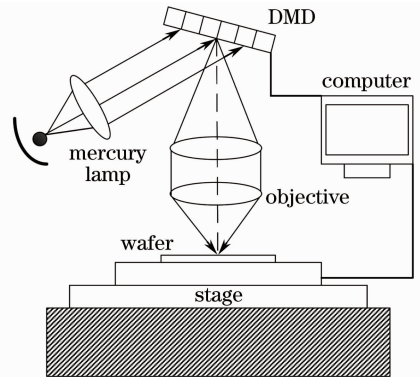


图 6 实验装置示意图

Fig. 6 Experimental setup schematic

度、直线性和正交性,且 DMD 位置需要精调至与工件台运动方向平行,然而实际并不能完全达到。为解决这一问题,通过本文提出的方法,进行了实验验证。

根据 DMD 无掩模光刻机的系统特点,单帧图形的曝光顺序如图 7 中箭头所示,并且每个子图形曝光前还需要上下反转。这可以通过编制好的程序自动分割实现。

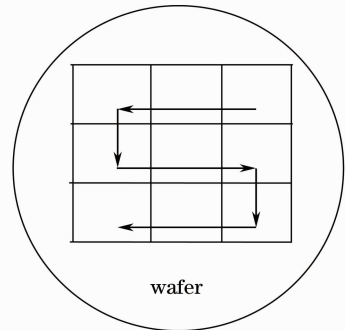


图 7 曝光示意图

Fig. 7 Exposure schematic

由(1)~(3)式、经验参数以及数字灰度光刻成像模型^[6],设定 $K_{\max} = 0.8, K_{\min} = 0.4, k_{\max} = 0.9, k_{\min} = 0.5, W_{\text{edge}} = 10 \text{ pixel}$ 。为使图形更清晰明了,图 8 中的模板图形用 $W_{\text{edge}} = 100 \text{ pixel}$ 代替。其中

A11 与 A12 是图 3 中对应位置的灰度边界调制模板。

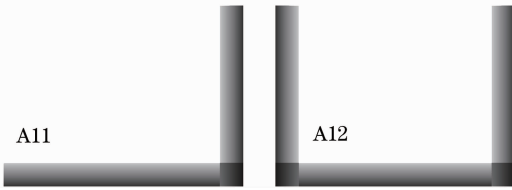


图 8 模板

Fig. 8 Mask

选取受 A11 与 A12 边界灰度模板调制的线条拼接后,显微镜下观察的实验结果如图 9 所示。图中虚线框区域垂直方向为左右 2 帧图形拼接的地方。观察拼接处的线条发现,左右连接平滑,没有明显的截断现象,图形整体上拼接自然,基本保持了原图形的连接情况。除此之外,线条曝光质量良好。而只用工件台步进拼接,会出现图 1(b)中第 1 个拼接错误情况,拼接处由于相邻 2 帧图形边界的灰度值都是 255,曝光后会使得拼接处线条出现台阶跃变,如图 10 所示。如果工件台步进定位精度产生误差,就会出现图 1 中的各种拼接误差情况。采用灰度边界调制的方法后,由于拼接时,相邻 2 帧图形要预先设置一定宽度(如 $W_{\text{edge}} = 10 \text{ pixel}$)的重叠区域,该区域的灰度值是渐变的,从而使得光刻胶被刻蚀的程度也是渐变的。只要在曝光前确定工件台的误差补偿值并采用这种图形预处理方法,可以在一定程度上消除图 1 中的各种拼接误差现象。

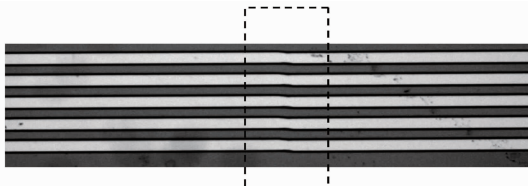


图 9 实验结果

Fig. 9 Experimental result

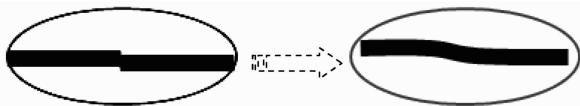


图 10 拼接效果示意图

Fig. 10 Schematic of matching effect

6 结 论

基于 DMD 的数字投影无掩模光刻技术,作为一种新颖的光刻技术,用 DMD 代替掩模,大大降低了掩模制作成本,具有广泛的应用前景。针对这种光刻技术大面积曝光图形存在的技术问题,提出了一种基于灰度渐变的图形边界调制方法实现图形的拼接。文中从理论上对常见的几种拼接误差问题做了分析,通过计算机模拟与实验相结合的研究方法证实了该方法的可行性。实验结果表明,与仅依靠步进工件台定位拼接相比,这种方法具有较好的拼接效果,与理论分析吻合,可以一定程度上解决大面积图形曝光存在的图形拼接问题,弥补了工件台定位误差的固有缺陷对图形拼接的影响。

参 考 文 献

- 1 L. J. Hornbeck. Deformable-mirror spatial light modulators[C]. *SPIE*, 1990, **1150**: 86~102
- 2 L. J. Hornbeck. Digital light processing for high-brightness, high-resolution application[C]. *SPIE*, 1997, **3013**: 27~40
- 3 S. Ri, M. Fujigaki, T. Matui *et al.*. Accurate pixel-to-pixel correspondence adjustment in a digital micromirror device camera by using the phase-shifting moiré method[J]. *Appl. Opt.*, 2007, **45**(27): 6940~6946
- 4 Guo Xiaowei, Du Jinglei, Chen Minyong *et al.*. Improving the edge profiles of lithography graphics using gray-tone technique in digital photolithography[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2006, **33**(11): 31~35
郭小伟, 杜惊雷, 陈铭勇等. 用灰度曝光技术改善数字光刻图形轮廓[J]. *光电工程*, 2006, **33**(11): 31~35
- 5 Zou Jingxian, Wu Rongzhi. Digital micromirror device [J]. *Chinese J. Liquid Crystals and Displays*, 2003, **18**(6): 445~449
邹静娴, 吴荣治. 数字显微镜器件[J]. *液晶与显示*, 2003, **18**(6): 445~449
- 6 Guo Xiaowei, Du Jinglei, Luo Boliang *et al.*. Imaging model for DMD-based gray-tone lithography system [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(9): 1412~1416
郭小伟, 杜惊雷, 罗铂靓等. 基于数字微反射镜灰度光刻的成像模型[J]. *光子学报*, 2006, **35**(9): 1412~1416
- 7 Han Chao, Wei Sui, Quan Xilong *et al.*. Holographic display of digital micro-mirror or device [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(1): 190~194
韩超, 韦穗, 权希龙等. 数字显微镜器件的全息显示[J]. *中国激光*, 2010, **37**(1): 190~194
- 8 Wang Dapeng, Wei Sui. Phase modulation properties of digital micromirror device [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(7): 1255~1260
王大鹏, 韦穗. 数字显微镜器件的相位调制性质[J]. *光学学报*, 2007, **27**(7): 1255~1260