

激光与光电子学进展

基于 MEMS 微镜的激光干涉直写设备曝光时间优化

余冠群^{1,2}, 吕柏莹¹, 许玥¹, 曾中明¹, 吴东岷^{1,2*}¹中国科学院苏州纳米技术与纳米仿生研究所纳米加工平台, 江苏 苏州 215123;²上海科技大学物质科学与技术学院, 上海 201210

摘要 使用微机电系统(MEMS)微镜搭建的光扫描式激光干涉直写设备具有体积小、直写速度快、光路简单等优点,但是其扫描时需要对曝光时间进行修正以达到均匀的曝光效果。介绍了该激光干涉直写设备的光路组成以及控制方法,利用查表法对生成的曝光图样和曝光时间参数进行了优化,使像素点直径变化从 84% 降低到了 6%,解决了应用 MEMS 微镜激光干涉直写设备时存在的曝光时间不均匀的问题。

关键词 激光光学; 激光干涉直写; 点阵光栅图; 微镜; 微纳结构加工

中图分类号 TN29

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP231088

Exposure Time Optimization of Laser Interference Direct Writing Device Based on MEMS Micromirror

Yu Guanqun^{1,2}, Lü Baiying¹, Xu Yue¹, Zeng Zhongming¹, Wu Dongmin^{1,2*}¹Nano-Fabrication Facility, Suzhou Institute of Nano-Tech and Nano-Bionics, Chinese Academy of Sciences, Suzhou 215123, Jiangsu, China;²School of Material Science and Technology, ShanghaiTech University, Shanghai 201210, China

Abstract Laser interference direct writing device constructed with MEMS (microelectro mechanical systems) micromirrors has advantages such as small size, fast writing speed and simple optical path. However, it is necessary to adjust the exposure time to achieve uniform exposure effect during scanning. We introduce the optical path composition and control method of this type of laser interference direct writing device. The lookup table method is used to optimize the generated exposure pattern and exposure time parameters, reducing the pixel diameter variation from about 84% to about 6%. It solves the problem of uneven exposure time in the application of laser interference direct writing devices based on MEMS micromirrors.

Key words laser optics; laser interference direct writing; dot matrix grating map; micromirror; micro-nano structure processing

1 引言

无油墨印刷是一种新型的印刷技术,它不需要传统印刷中使用的油墨或色料,通过模板压印逐点变化的光栅像素点就可以实现彩色印刷^[1]。激光干涉直写设备是制作这种点阵光栅图模板的关键设备^[2-4],它不需要掩模版,只需输入设计图样即可在光刻胶上曝光出相应的彩色点阵,通过后续显影、刻蚀、喷银等工艺就可以产生理想的压印模板。目前市场上已经有成熟的激光干涉直写设备^[5-7],其主要扫描方式有

两种:一是使用移动载物台的方式进行逐点曝光^[8],这种方法扫描速度很慢,样件的加工时间常以数天计;二是使用空间光调制器等器件,一次曝光可以获得多个光栅点阵^[9-10],这种方法光路复杂,需要对激光光源进行大直径扩束等,容易引入其他影响点阵光栅图质量的问题。

针对目前激光干涉直写设备速度慢、图案光刻周期长的缺点,本文设计并搭建了一种新型的基于微机电系统(MEMS)微镜的光扫描式激光干涉直写设备。将 MEMS 微镜作为系统的光扫描器件,在曝光时,不

收稿日期: 2023-04-17; 修回日期: 2023-05-09; 录用日期: 2023-05-19; 网络首发日期: 2023-07-12

基金项目: 国家重点研发计划(2021YFB3202200)

通信作者: *dmwu2008@sinano.ac.cn

同像素位置的扫描时间是不均匀的,故要对每个像素点的曝光时间进行修正。

2 设备与控制方法

2.1 激光干涉直写设备

系统整体设计如图 1 所示^[11]。激光扫描头主要由激光光源、1/4 波片和二维 MEMS 微镜组成。激光光源可以接收调制信号,输出可控制的激光脉冲;1/4 波片可以将激光光束的相位延迟 $\pi/2$,使入射光的线偏振状态转换为圆偏振状态,从而使分光光栅旋转到不同

角度时与同级次的衍射光的光强基本一致;二维 MEMS 微镜则用于光束扫描。激光分光干涉光路部分由扫描透镜、相位光栅^[12]及装载相位光栅的电动旋转转移台、遮光片以及双镜头组成的 $4f$ 成像系统组成。使用长度分别为 30、60 mm 的笼式系统杆将扫描透镜和光栅及位移台固定在基板上,基板中心固定有 $4f$ 系统的一个镜头。基板由 4 根支撑柱固定,支柱上使用滑动块固定着一个活动板,将另一个镜头装配在活动板上,支柱则固定在标准光学面包板上。设备整体实物图如图 2 所示。

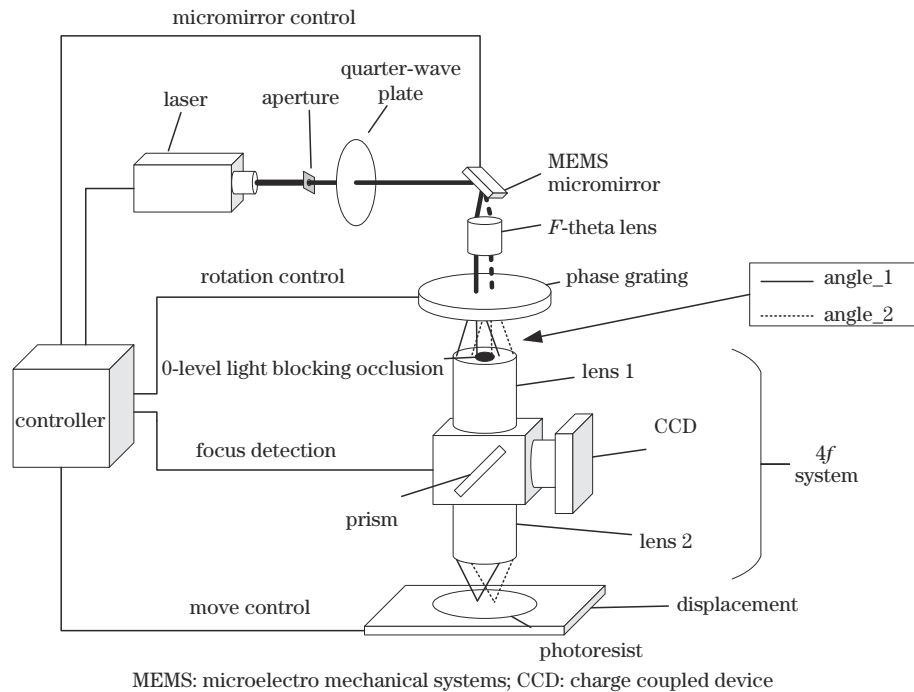


图 1 系统设计示意图

Fig. 1 Schematic diagram of system design

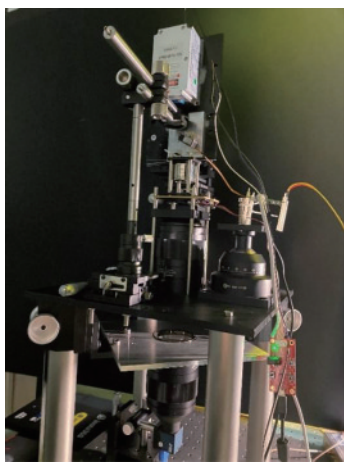


图 2 整机实物图

Fig. 2 Picture of the whole machine

2.2 控制方法与曝光时间修正

二维 MEMS 微镜的扫描方式^[13]如图 3 所示。微镜根据两轴工作状态主要分为三类^[14]:第一种是准静

态模式,这种场景下微镜的两个转轴都处于准静态模式,可以被任意调节到设定的频率运行,反射光束可以保持其位置或者以均匀的速度扫描,或显示矢量图形等;第二种是混合模式,即其中一个轴工作在谐振模式,另一个轴工作在准静态模式,这时谐振工作的快轴使反射光束快速扫描出水平线,慢轴被锯齿波驱动使反射光束纵向扫描覆盖图像区域;第三种是谐振模式,这种情况下两个轴都工作在谐振模式,可以获得较高的扫描速度,在经过一定速度调制后,可产生图 3(c) 所示的李萨如图形等。但是此时扫描行为只能在固定的频率上进行,可变动的范围非常小。特别地,当工作在准静态模式下的微镜被驱动工作在谐振频率附近时,镜面转动角度可能会超过安全范围而使微镜损坏。因此在接近谐振频率操作时,需要提供较低的电压来保证器件安全。当二维 MEMS 微镜应用在本激光干涉系统中时,为了保证扫描速度和一定精度,一般使用一轴谐振模式、一轴准静态模式的混合模式^[15]。此时

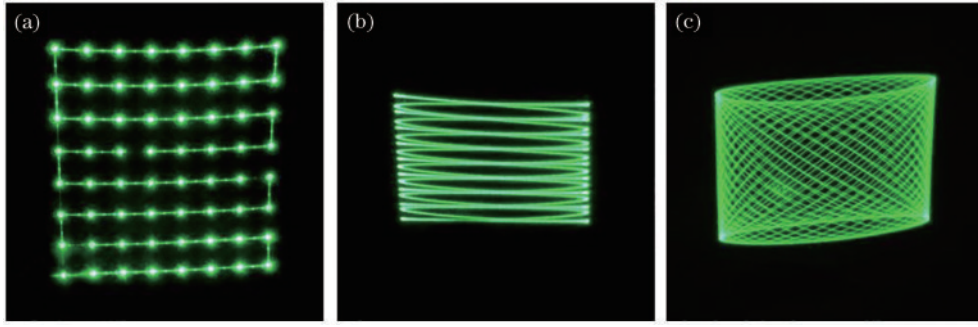


图3 二维MEMS微镜扫描模式。(a)准静态模式;(b)混合模式(慢轴工作于准静态模式,快轴工作于谐振模式);(c)两轴均处于谐振模式

Fig. 3 Two-dimensional MEMS micromirror scanning modes. (a) Quasi-static mode; (b) mixed mode (the slow and fast axes are in quasi-static and resonance modes, respectively); (c) both axes are in the resonance mode

光斑在快轴方向上的运动可看成简谐运动:

$$x = A_0 \sin(\omega_0 t + \varphi_0), \quad (1)$$

式中: x 为位移距离; A_0 、 ω_0 、 φ_0 均为常量; t 为时间。在镜面偏转到最大角度极限时,角速度相对最小;相反,当镜面处在零角度时,角速度相对最大。而慢轴运动处于准静态模式,光斑运动速度则几乎不受影响。

在干涉直写曝光时,微镜处于持续偏转的状态,在 t_0 、 t_1 、 t_2 等时刻触发激光器开始输出光脉冲进行曝光,如果在一次扫描曝光过程中每个像素点的曝光时间是固定值,则曝光区域的大小会有偏差。在边缘区域,由于扫描角速度慢,曝光区域偏小;而在中间区域曝光区域则会偏大,出现曝光畸变,如图4所示。

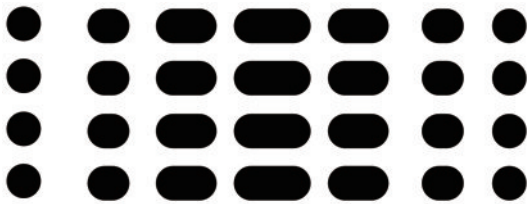


图4 曝光时间畸变示意图

Fig. 4 Schematic diagram of exposure time distortion

对光斑的运动分析如图5所示。在快轴运动方向上,每当光斑移动相同距离 x_p 时,其时间 t 分布呈arcsin函数分布:

$$t_n = \begin{cases} \arcsin[(N-n)x_p], & 0 \leq n < N \\ \arcsin[(n-N)x_p], & -N < n < 0 \end{cases}, \quad (2)$$

式中: N 为快轴单向扫描时的像素总数; t_n 则为不同像素的触发时刻。

修正后的每个像素的扫描持续时间 T_n 则表示为

$$T_n = k(t_{n+1} - t_n), \quad (3)$$

式中, k 为常量,与像素大小和扫描范围有关, k 越大则单个像素尺寸越大。

通过查表法修正曝光时间,得到某行的曝光时间分布示意图如图6所示,则在相同大小的像素区域内,

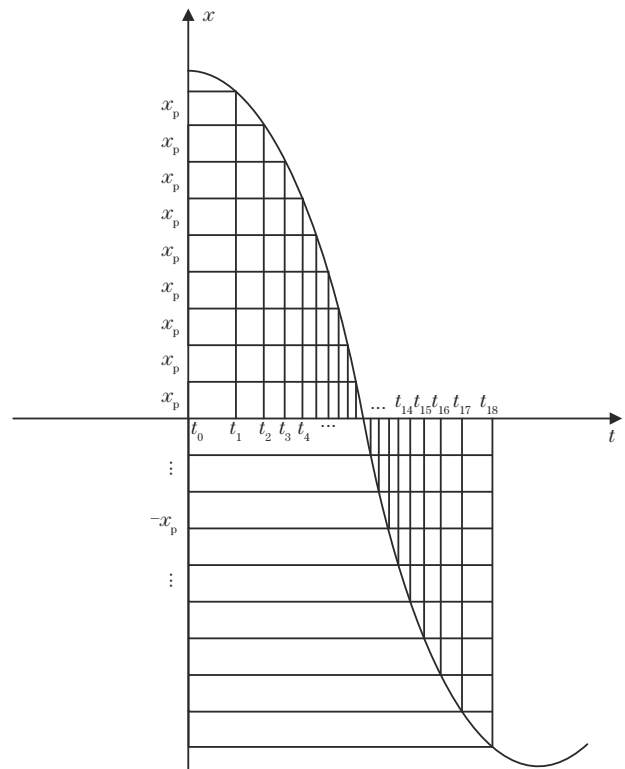


图5 行扫描示意图

Fig. 5 Schematic diagram of line scanning

曝光时间有所区别。

本系统使用的二维MEMS微镜驱动板上的外接引脚将快轴和慢轴的压阻传感器的反馈信号分别引出,作为控制激光器同步输出光脉冲的同步信号。同步信号会提供微镜偏转到不同像素位置对应的角度的触发边沿信号,现场可编程门阵列(FPGA)接收信号后,结合设计图样信息触发激光器输出打点脉冲。系统控制流程图如图7所示。

在FPGA下位机中,扫描同步输出模块的输入分别有存储单元(RAM)的写地址和写数据信号、微镜驱动板提供的同步信号、当前帧曝光开始信号、系统时钟和复位信号等,模块的输出则有激光器的触发信号和

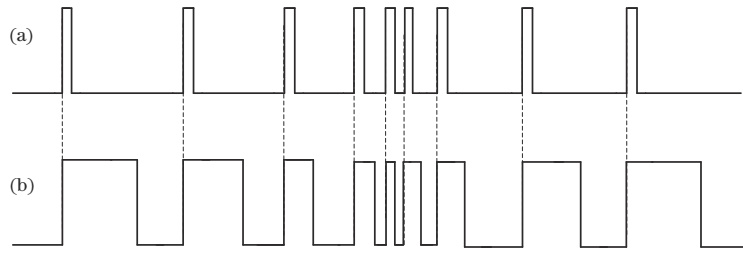


图 6 某行点阵扫描波形。(a)修正前;(b)修正后

Fig. 6 Scanning time waveforms in a line. (a) Before correction; (b) after correction

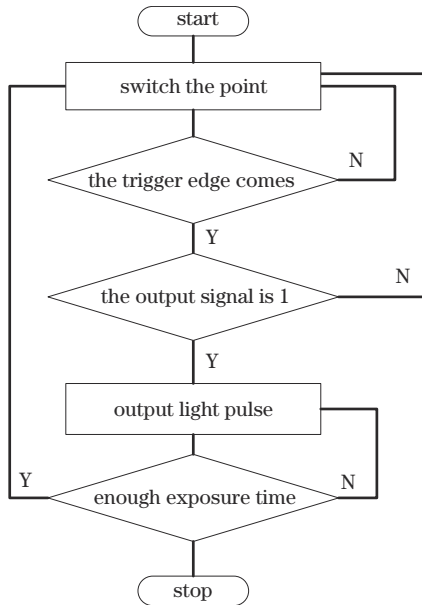


图 7 控制流程图

Fig. 7 Control flowchart

当前帧曝光结束信号。RAM 中每个地址的二进制数据则代表当前颜色下该图像每行的像素信息。寄存器读取 RAM 的数据后,在每个同步信号上升沿到来时,将数据按位输出。信号输出高电平代表当前偏转角度下激光器输出光脉冲,在当前位置刻下光栅像素点;信号输出低电平则代表当前偏转角度下的像素不属于该颜色层,继续等待下一个扫描同步信号上升沿的到来。满足曝光时间后则拉低激光器触发信号。

对于同一款光刻胶而言,干涉直写曝光存在时间

窗口,曝光时间过短会使光刻不充分,干涉条纹不清晰;而由于高斯光束光强分布的影响以及杂散光的干扰,曝光时间过长会使像素中心过曝或干涉条纹被破坏,故不同位置的像素点要重复不同的扫描次数,以使像素质量一致。在设计图样时,修正方法如图 8 所示。在扫描一帧图样时,每列像素点的曝光时间分别为 t_1 、 t_2 、 t_3 、 t_4 ,则重复曝光次数 $N_1 = T/t_1$ 、 $N_2 = T/t_2 - N_1$ 、 $N_3 = T/t_3 - N_2$ 、 $N_4 = T/t_4 - N_3$,其中 T 为通过实验得出的单个像素合适的曝光时间,这样即可在最短时间内完成尽可能均匀的曝光。

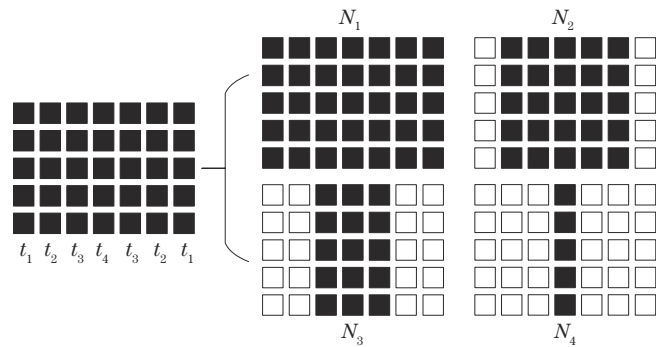


图 8 设计图样分解曝光修正示意图

Fig. 8 Schematic diagram of design pattern decomposition exposure correction

在实验中,对于 32 列的设计图样,前 15 列查找表数据如表 1 所示。在 FPGA 的 RAM 中预存表 1 中的数据,不同列的像素曝光时触发不同的时间参数,即达到曝光时间优化的目的。

表 1 32 列图样的部分查找表参数

Table 1 Partial parameters of search table for 32 column patterns

Column number	Exposure time for a frame /ms	Repeat number	Column number	Exposure time for a frame /ms	Repeat number
1	2.00	750	9	1.04	1442
2	1.68	892	10	1.02	1420
3	1.46	1027	11	1.00	1500
4	1.34	1119	12	984.00	1524
5	1.26	1190	13	984.00	1524
6	1.18	1271	14	962.00	1559
7	1.12	1339	15	962.00	1559
8	1.08	1388

3 实验与分析

首先,通过实验确认单个像素的合适曝光时间^[16-17]。曝光实验主要使用AZ5214正性光刻胶作为曝光对象。使用标准的清洗流程对样品硅片进行清洗,确保样品表面的清洁;再将清洗好的样品片放置在匀胶机上以4000 r/min的转速旋涂30 s;旋涂结束后使用热板进行前烘,温度为95 °C,时间为90 s,此时得到的样品胶片厚度约为1.4 mm^[18]。

曝光前使用电荷耦合器件(CCD)相机进行对焦检测,得到焦面高度参数为20 mm,即样品片到镜头下表面的距离为20 mm。调整位移台至合适高度,放置样品片。利用单像素曝光模块控制曝光时间,得到不同曝光时间下的光栅像素图案。图9为光学显微镜拍摄的图

片,其中:图9(a)为曝光300 ms;图9(b)为曝光500 ms;图9(c)为曝光1000 ms;图9(d)为曝光1500 ms;图9(e)为曝光2000 ms;图9(f)为曝光3000 ms。从图9中可以看出:当曝光时间为300 ms时,虽然出现干涉条纹,但是条纹不清晰,在光刻胶上不能得到目标大小的光栅像素点;当曝光时间为3000 ms时,干涉条纹明显,但是衍射现象以及系统的杂散光会使目标区域出现干扰条纹,影响微观成像结果。随着曝光时间的增加,光斑直径略有增大,这是光束内光强的不均匀分布导致的。故通过实验可知合适的曝光时间应在1500 ms左右,此时光斑大小为60 μm左右,杂散光对像素点内条纹的影响也相对较弱。在宏观表现上,人眼能观察到像素点在不同方向上呈现出的不同颜色。

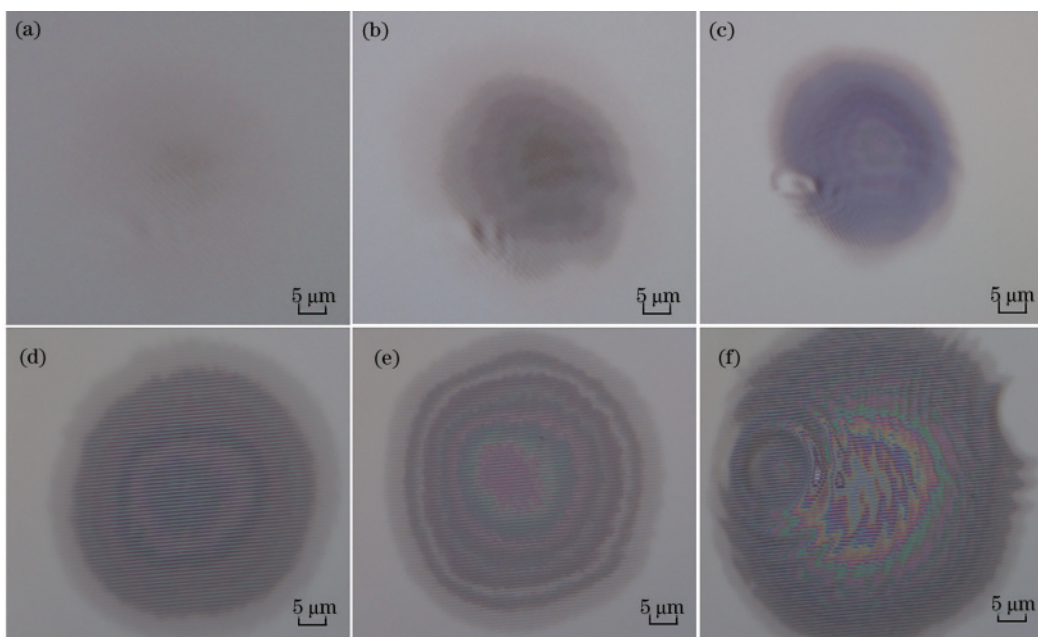


图9 不同曝光时间下的单像素曝光实验结果。(a) 300 ms;(b) 500 ms;(c) 1000 ms;(d) 1500 ms;(e) 2000 ms;(f) 3000 ms
Fig. 9 Single pixel exposure experiment results at different exposure time. (a) 300 ms; (b) 500 ms; (c) 1000 ms; (d) 1500 ms; (e) 2000 ms; (f) 3000 ms

在得到曝光时间窗口参数后,设计点阵光栅图如图10(a)所示。图案由一个“哭脸”和一个“笑脸”组成。设置曝光时间为1500 ms,选择“哭脸”区域进行

曝光时间修正,则修正后边缘处像素曝光重复次数为750次,中心区域像素曝光重复次数为1559次;而“笑脸”区域不进行曝光时间修正,以作对比。

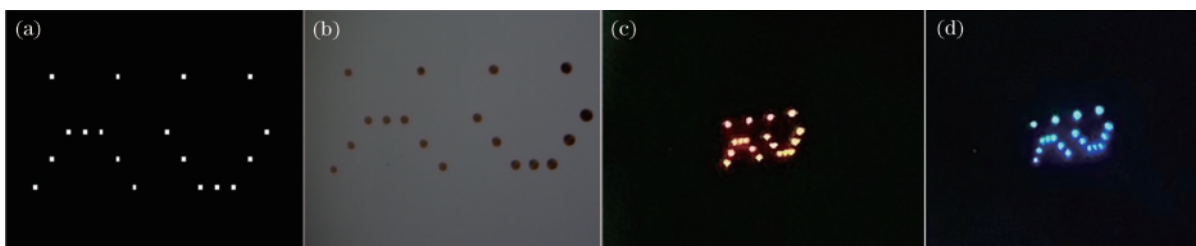


图10 曝光时间修正实验结果。(a)设计图样;(b)5倍光学显微镜下的观察结果;(c)(d)不同视角下的观察结果
Fig. 10 Exposure time correction experimental results. (a) Design pattern; (b) 5 times optical microscope observation results; (c) (d) observation results in different perspectives

图 10(b)为 5 倍光学显微镜观察到的曝光结果,未进行曝光时间修正的“笑脸”区域存在像素点大小不均匀的情况,而经过修正的“哭脸”区域的像素点大小则基本一致。曝光后的图像如图 10(c)、(d)所示,它们分别是不同视角下的观察结果。

统计的像素点直径大小分布如图 11 所示,可见:未修正时像素点直径最大为 120 μm ,最小为 65 μm ,变化范围达 55 μm ,波动程度在 84% 左右;而修正后像素点直径最大为 65 μm ,最小为 61 μm ,变化范围为 4 μm ,波动程度为 6%。

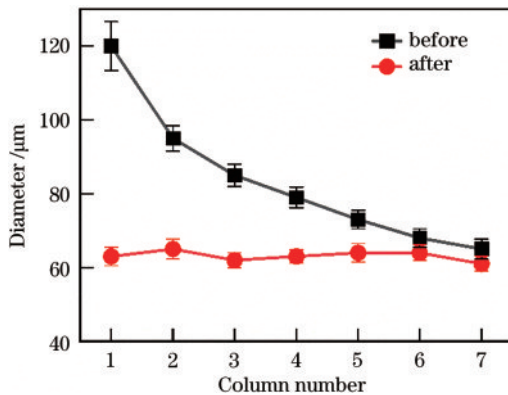


图 11 修正前后像素点直径对比

Fig. 11 Comparison of the pixel diameters before and after correction

利用修正结果曝光复杂图形,结果如图 12 所示,其中:图 12(a)为设计图样,总体分为 4 个部分,每个部分曝光时对应的光栅角度不同;图 12(b)为曝光结果照片,其中每个部分的光栅条纹方向用 I、II、III、IV 标识,条纹角度分别为 0° 、 4° 、 8° 、 12° 。可以看出,在同一观察视角下,设计不同角度的色块会呈现出不同的颜色。

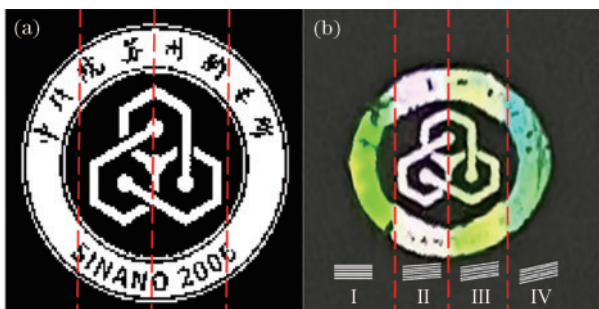


图 12 曝光图样。(a)设计图样;(b)实验结果

Fig. 12 Exposure pattern. (a) Design pattern; (b) experimental result

4 结 论

分析了将 MEMS 微镜作为光扫描器件的激光干涉直写设备在曝光时的曝光时间不均匀现象,对曝光时间和设计图样进行了修正,将像素点直径波动大小

从 84% 降到 6%,提高了 MEMS 激光干涉直写设备的曝光质量,并由此得到了较好的曝光图形结果。在后续研究中,将通过提高光束质量、改变光刻胶型号、改善工艺参数等措施继续优化设备的曝光效果。

参 考 文 献

- [1] 李耀棠, 王天及, 杨世宁, 等. 点阵光栅全息图的研究[J]. 激光杂志, 1999, 20(5): 29-31.
Li Y T, Wang T J, Yang S N, et al. Theoretical and experimental study of dot matrix hologram[J]. Laser Journal, 1999, 20(5): 29-31.
- [2] Cai L Z, Yang X L, Wang Y R. Formation of a microfiber bundle by interference of three noncoplanar beams[J]. Optics Letters, 2001, 26(23): 1858-1860.
- [3] Xiao Y, Zhang Y H, Shi Y Q, et al. The study on optical lattice formed by four-beam interference[J]. Optik, 2016, 127(22): 10421-10427.
- [4] Rößler F, Kunze T, Lasagni A F. Fabrication of diffraction based security elements using direct laser interference patterning[J]. Optics Express, 2017, 25(19): 22959-22970.
- [5] 叶燕, 马亚骥, 宋志, 等. 基于傅里叶变换光学系统的动态多光束干涉光刻[J]. 光学学报, 2023, 43(8): 0822015.
Ye Y, Ma Y Q, Song Z, et al. Dynamic multi-interference lithography incorporating modulated optical Fourier transform system[J]. Acta Optica Sinica, 2023, 43(8): 0822015.
- [6] 谢芳琳, 王雷, 黄胜洲. 基于数字微镜器件的无掩模数字光刻技术研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(11): 1100010.
Xie F L, Wang L, Huang S Z. Research progress of maskless digital lithography technology based on digital micromirror device[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(11): 1100010.
- [7] 周子逸, 董贤子, 郑美玲. 数字微镜无掩模光刻技术进展及应用[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(9): 0922030.
Zhou Z Y, Dong X Z, Zheng M L. Development and application of maskless lithography technology for digital micromirrors[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(9): 0922030.
- [8] Konkola P T, Chen C G, Heilmann R K, et al. Nanometer-level repeatable metrology using the nanoruler[J]. Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures, 2003, 21(6): 3097-3101.
- [9] 吴智华, 周小红, 魏国军, 等. 采用 DMD 并行输入的激光干涉直写方法[J]. 激光与红外, 2008, 38(5): 424-428.
Wu Z H, Zhou X H, Wei G J, et al. A way of parallel interferential laser direct writing with DMD[J]. Laser & Infrared, 2008, 38(5): 424-428.
- [10] 吴智华, 魏国军, 周小红, 等. 高分辨率衍射图形的 DMD 并行激光干涉直写[J]. 光子学报, 2008, 37(9): 1784-1787.
Wu Z H, Wei G J, Zhou X H, et al. High resolution

- diffraction patterns with DMD laser direct interferential writing system[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, 37(9): 1784-1787.
- [11] 吴东岷, 余冠群, 曾中明, 等. 光扫描式激光干涉直写设备及直写方法: CN115268236A[P]. 2022-11-01.
Wu D M, Yu G Q, Zeng Z M, et al. Optical scanning type laser interference direct writing equipment and direct writing method: CN115268236A[P]. 2022-11-01.
- [12] 邹意蕴, 林佳丽, 卢悦媛, 等. 相位型光栅的衍射及分光功能[J]. *大学物理*, 2021, 40(11): 64-68.
Zou Y Y, Lin J L, Lu Y Y, et al. Diffraction and splitting function of phase grating[J]. *College Physics*, 2021, 40(11): 64-68.
- [13] 王晰晨. 基于二维 MEMS 微镜扫描的高强度分辨率三维成像激光雷达系统研究[D]. 重庆: 重庆理工大学, 2022.
Wang X C. Research on high intensity resolution 3D imaging lidar system based on 2D MEMS micromirror scanning[D]. Chongqing: Chongqing University of Technology, 2022.
- [14] 单亚蒙, 任丽江, 沈文江. 应用于激光雷达的二维静电微镜设计[J]. *传感器与微系统*, 2021, 40(2): 65-68, 72.
Shan Y M, Ren L J, Shen W J. Design of two-dimensional electrostatic micromirror for lidar[J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2021, 40(2): 65-68, 72.
- [15] 余晖俊, 李小光, 沈文江. 应用于单目 3D 相机中 MEMS 镜的扫描角度补偿[J]. *光子学报*, 2021, 50(12): 1212001.
Yu H J, Li X G, Shen W J. Scanning angle compensation of MEMS mirror applied in monocular 3D camera[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2021, 50(12): 1212001.
- [16] 于航. 激光干涉光刻技术的开发与应用研究[D]. 上海: 复旦大学, 2013.
Yu H. Research on development and application of laser interference lithography[D]. Shanghai: Fudan University, 2013.
- [17] 彭伏平. 基于激光干涉光刻的复合光场调制技术研究[D]. 成都: 中国科学院光电技术研究所, 2021.
Peng F P. Research on composite light field modulation technology based on laser interference optical carvings [D]. Chengdu: Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, 2021.
- [18] 崔铮. 微纳米加工技术及其应用综述[J]. *物理*, 2006, 35(1): 34-39.
Cui Z. Overview of micro/nanofabrication technologies and applications[J]. *Physics*, 2006, 35(1): 34-39.