

文章编号:1004-4213(2010)04-0600-5

基于数字微镜器件亚微米制备技术研究*

陆锦洪, 谢向生, 张培晴, 周建英[†]

(中山大学 光电材料与技术国家重点实验室, 广州 510275)

摘要:为了实时、便捷的改变光刻图案以用于微纳光子器件制备,使用数字微镜器件构建了一套无掩模亚微米尺度制备系统.基于阿贝成像原理分析了周期结构在相干光照明下的成像过程,并用数值模拟以及空间滤波实验证明了这个过程.使用此实验系统制作出了周期为 900 nm 的二维结构以及周期为数十微米的带缺陷结构.实验表明,使用数字微镜器件可以方便的制作出亚微米尺度的图案.

关键词:干涉光刻;傅里叶光学;微纳光子器件;阿贝成像原理;数字微镜器件

中图分类号: O438

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20103904.0600

0 引言

微纳光子器件通过在波长和亚波长尺度上对光的操控,实现各种各样光操控功能.微纳光子器件制备方法主要有化学自组织生长法、逐点微加工法、光学全息制备法^[1-2]和多步骤组合法.其中光学全息制备法通常采用多光束干涉的方法,形成空间周期排列的光强分布,再作用于感光材料,将空间光强分别刻蚀在材料上.此方法无缺陷、大体积、成本低、效率高、品质好,具有应用于大规模生产的潜力.借鉴于光刻技术多年来的发展经验,特别微小型化技术革命(Resolution Enhancement Technology, RET)^[3]的影响,光学全息制备法同样在激光光源,光刻胶和光学装置上不断取得进步,周期特征尺度也缩小至十纳米级.但是,光学全息制备法通常采用的是简单的光场合成,仅能得到简单周期排列的微纳结构,对于更加复杂和实用的功能性光子晶体和光子器件的制备,需要更多的技术的结合.光学邻近效应校正,相移掩模和离轴照明成为 RET 的三大主要技术,通过它们的不断革新,RET 使得光刻尺寸不断缩小并紧跟着产业需要,服从和满足摩尔定律,在集成电路制造业中发挥了重要的作用.

数字无掩模光学投影蚀刻是一种新兴的无掩模光刻技术^[4],它通过计算机实时产生一些特殊的数字化图案,并加载在空间光调制器,使得光学投影的图案可以任意调制.常见空间光调制器有液晶显示

器件 LCD、等离子体显示器件和数字微反射镜器件(Digital Micromirror Device, DMD)等.而 DMD 是目前唯一的一种大批量生产的纯数字化空间光调制器.因此数字光学无掩模光刻技术的研究基本上都是基于 DMD 空间光调制器的^[5,6].国内 DMD 研究主要用于大尺寸的灰度光刻^[7,8],而在亚微米尺度的光刻技术研究还处于起步阶段,相关的研究报告或论文也很少,且一般处于理论研究或数值模拟阶段,所制作结构图案其特征尺寸较低大,无法真正满足微光机电系统的要求.

本文介绍了使用 DMD 作无掩模光刻制备法,比国内原来最小准确度有了较大提高^[9-11],达到国际最先进水平^[12],首次制作出了周期为微米以下的二维结构,并根据数值模拟与实验,提出了在相干光照明下的 DMD 成像过程应该使用阿贝成像原理进行解释.

1 实验系统及分析

实验系统的成像部分如图 1.波长为 532 nm 的激光依次经过物镜、小针孔及消色差透镜后成为平行光照射在 DMD 上.计算机设计的图形经 I/O 接口以二进制数字形式输入到 DMD 芯片上的静态随

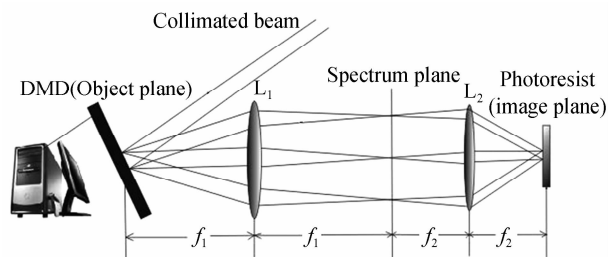


图 1 实验原理

Fig. 1 Schematic diagram of the experiment

* 国家自然科学基金(10774193、10934011)和国家重点基础研究计划项目(2010CB923204)资助

[†] Tel: 020-84110277 Email: stszjy@mail.sysu.edu.cn

收稿日期: 2009-09-10

修回日期: 2009-10-13

机存储器(SRAM),从而控制镜片的翻转,实现图像输出。

成像系统是一个 $4f$ 系统.把 DMD 上的图案设置为二维光栅,周期为 $28\ \mu\text{m}$.平行光照射在 DMD 后,经衍射分解为向不同方向传播的多束平行光(每一束平行光对应一定的空间频率),再经过物镜分别聚焦在后焦面上形成点阵,这点阵就是光栅的夫琅和费衍射图.然后不同空间频率的光束又经过 L_2 重新在像平面上复合成像,形成最终图案并作用在 L_2 后焦面上的光刻胶,亦即 DMD 上的图像经过缩小后在光刻胶处重新成像。

实验中, L_1 使用大焦距、大孔径的透镜,收集尽可能多的衍射级.理论及实验均表明,收集尽可能多的衍射级可以提高成像锐度,过少的衍射级甚至不能成像. L_2 为小焦距、大孔径的非球面镜.非球面镜比一般透镜具有更大的数值孔径,且消除了球差,可以大幅度提高成像品质。

在本实验中,DMD 相当于传统光刻中的掩模.一块 DMD 是由成千上万个微小、可倾斜的铝合金镜片组成^[9],可通过脉冲宽度调制决定每个镜片倾斜在某个方向上为多长时间.镜片可以在一秒内开关 256 次,即最多可实现 256 级的灰度,这一速度允许数字灰度和颜色再现,实现灰度光刻及全息显示^[13-14].与常规的数字化空间光调制器相比,数字微镜器件具有更高的光能利用率、分辨率高、响应速度快、工作温度范围大等优点。

本实验中采用的 DMD 主要参量为:1)像元数: $1\ 024\times 768$;2)像元尺寸: $13.68\times 13.68\ \mu\text{m}^2$;3)微镜间距: $0.32\ \mu\text{m}$;4)反射镜转角: $\pm 12^\circ$;5)灰度阶: 256.

图像精缩倍数由两面透镜的焦距决定,而最终所得图案周期为

$$d=D\times(f_2/f_1) \quad (1)$$

式中 D 为 DMD 上图案周期。

2 周期结构的相干光成像

当用 DMD 实现灰度显示时,各像素之间是往往是没有规则的开关状态.因此,相互之间的干涉效应并不明显,特别是使用非相干光作照明光源时,因此整个 DMD 阵列图形的像面光强可视为单个微镜光强分布的叠加^[9].但当使用相干光照明周期结构图案时,干涉效应就会十分明显,此时必须使用波动光学来进行分析处理.阿贝成像原理认为,相干成像过程可以分成两步完成:第一步,物体在相干光照明下,可以看作一个复杂的光栅,照明光通过物体被衍射,衍射光波在透镜后焦面上形成物体的夫琅和费

衍射光斑图样;第二步,各衍射光斑作为新的次波波源发出球面子波,在像平面上相干叠加形成物体的像^[15].

一般来说,像和物不可能完全一样,这是由于透镜的孔径是有限的,总有一部分衍射角度较大的高频信息不能进入到物镜而被丢弃,所以像的信息总是比物的信息要少一些。

对于非周期结构图像而言,相干光照射后衍射不明显,很容易就收集到足够的信息形成清晰图像.而相干光照射周期图案后衍射角度大,一般无法收集到足够信息,而只能收集到其中的低频信息,从而无法把图像中的细节重新成像出来.因此,目前使用 DMD 作无掩模光刻一般用于非周期结构的光刻,如微机电系统等.这种类型的光刻不需要大孔径的透镜收集较多的衍射级用于重新成像。

本文使用 Matlab 对相干光照明下的 DMD 成像过程进行了数值模拟.相干光入射到一个如图 2(a)所示的二维周期结构后,其衍射光各级频率成分沿着不同的角度向远处传播,考虑到透镜尺寸有限,只有其低频成分最终被收集,并经过 $4f$ 系统在透镜 L_2 的后焦面最终重新成像.只收集图 2(b)所示的中间 9 级低频成分,舍弃其余较难收集的高频成分,相当于在频谱面处加上了一个空间滤波器,此时恢复所得图案如图 2(c)。

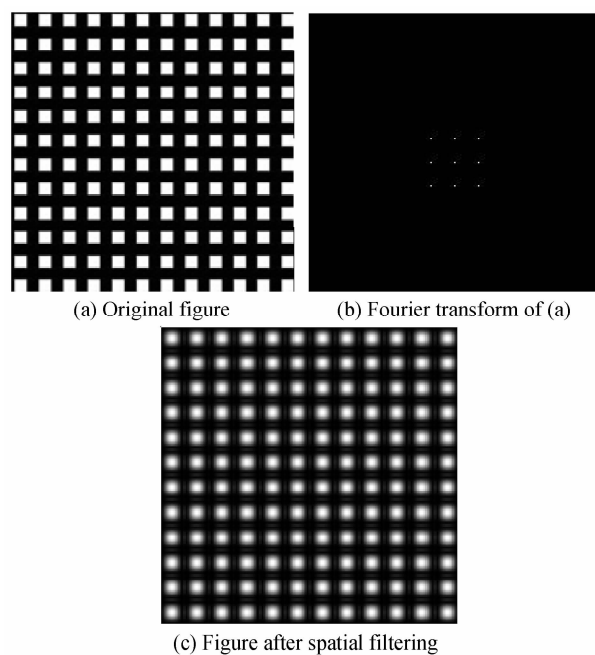


图 2 阿贝成像原理的数值模拟

Fig. 2 Numerical simulation of principle of Abbe's imaging

由此模拟过程可以看到,由于透镜尺寸的限制,当丢弃图像的高频成分后还原所得图像的精细结构丢失,在正方形图案中表现为边角变为模糊不清,所得图案类似圆形。

在 RET 革命的第一次飞跃中, Saleh 提出光刻过程是一个透镜光阑的低通滤波效应和光刻胶的阈值聚会效应的结合, 可以简单的分析为成像系统是一个傅里叶变换、低通滤波和反傅里叶变换的结合^[3].

平面物体的图像可由一个二维函数 $t(x_1, y_1)$ 描述, 设空间滤波器透过率为 $F(f_x, f_y)$, 则频谱面后的光场复振幅为

$$u_2' = T(f_x, f_y) F(f_x, f_y) \quad (2)$$

式中 $T(f_x, f_y) = F\{t(x_1, y_1)\}$, 空间频率 f_x, f_y 与坐标 x_2, y_2 的关系为

$$f_x = \frac{x_2}{\lambda f}, f_y = \frac{y_2}{\lambda f} \quad (3)$$

式中 $F\{\}$ 为傅里叶变换算符; λ 为激光波长; f 是变换透镜 L_1 的焦距. 而像面得到的是 u_2' 的傅里叶逆变换, 即

$$\begin{aligned} u_3' &= F^{-1}\{u_2'\} = F^{-1}\{T(f_x, f_y) * F(f_x, f_y)\} = \\ &= F^{-1}\{T(f_x, f_y)\} * F^{-1}\{F(f_x, f_y)\} = \\ &= t(x_3, y_3) * F^{-1}\{F(f_x, f_y)\} \end{aligned} \quad (4)$$

式中“*”表示卷积运算, 式(4)表明像面得到的结果, 是物的几何像与滤波器逆变换的卷积. 由此可知, 改变滤波器的透过率函数, 可改变像面上的图像.

通过实验可以验证此理论. DMD 上显示图像如图 3(a), 其结构为二维光栅, 光栅常量为 $112 \mu\text{m}$. 在 L_1 与 L_2 之间(频谱面处)放一小孔光阑, 在 L_2 的后焦面处用 CCD 记录图像. 当小孔开为最大时, 所得图像如图 3(b), 成像与 DMD 上图像基本一致. 逐渐缩小光阑, 当只有其中最低几级衍射通过小孔时,

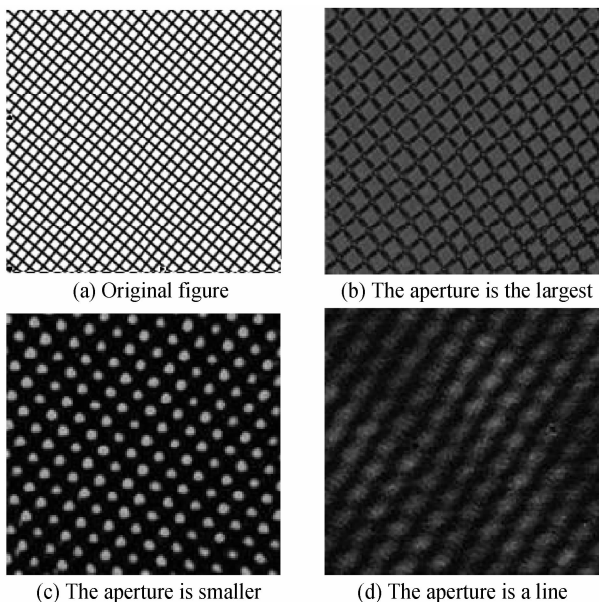


图3 阿贝成像理论的实验验证

Fig. 3 Experimental validation of principle of Abbe's imaging

由于高频信息丢失, 故矩形图案的边缘逐渐模糊, 此时所得图像大致为圆形, 如图 3(c). 当小孔缩小到最小时, 只有 0 级衍射通过, 此时 CCD 上显示的是一片亮光. 把小孔光阑取走, 并用两卡片挡住上下光, 只留中间一排衍射光斑通过, 此时成像为一维条纹, 如图 3(d). 这与阿贝成像理论吻合且与阿贝一波特实验完全一致.

3 光刻实验结果

使用此光路系统, 本文成功地在正性胶上制作了各种周期的二维周期结构, 其中最小周期为 900 nm , 为目前国际上使用 DMD 制作的最小周期尺寸.

实验表明, 利用图 1 所示成像系统可以制作出周期为 $1 \mu\text{m}$ 以下的二维周期结构, 而当图像周期较大时, 衍射角较小, 容易收集到较高频信息, 把图像中的精细结构重新显示出来, 从而可以制作带缺陷的二维周期结构, 如图 4(d).

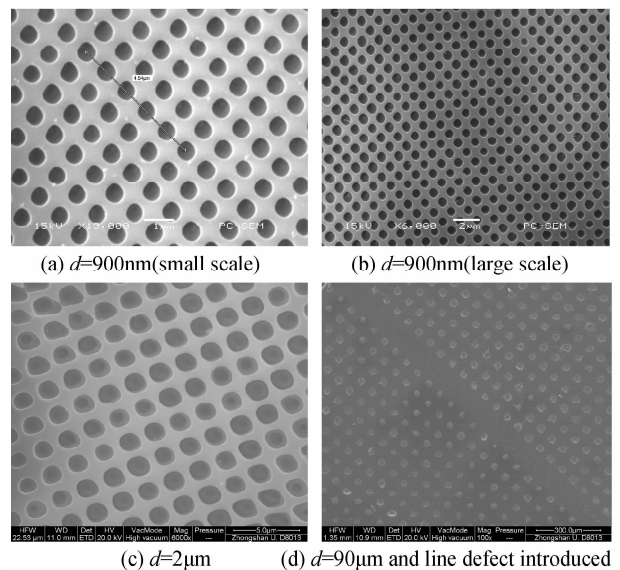


图4 光刻结果的 SEM 图

Fig. 4 SEM of the lithography result

3.1 像方数值孔径与分辨率

光学系统的分辨率反映光学系统传递信息密集度的能力. 光学系统能够传递单位面积上的信息量越大, 则表示其分辨本领越高. 根据瑞利判据, 成像光学系统的分辨率与其数值孔径 NA 、照明光波长 λ 的关系为

$$R = k_1 \lambda / NA \quad (5)$$

式中, k_1 为与抗蚀剂和工艺有关的常量, 在此取为 0.77. 在本实验系统中, 成像透镜 L_2 的数值孔径为

$$NA = n_0 \sin \theta = 0.673 \quad (6)$$

因此, 相干照明下的像方分辨率为

$$R = 0.77 \times (\lambda / NA) = 608 \text{ nm} \quad (7)$$

3.2 精缩倍数及光刻图案周期

本实验系统系统的精缩倍数即经缩小后的图像大小与原图像大小的比值,它由 L_1 与 L_2 的焦距之比决定,即

$$N = (f_1/f_2) = 700/22.5 = 31.1 \quad (8)$$

DMD 上图像周期为 $28 \mu\text{m}$,由式(1)可得,精缩后周期为

$$d = D \times (f_2/f_1) = 900 \text{ nm} \quad (9)$$

这与电子显微镜测量结果一致。

3.3 焦深

根据瑞利判据,当光学系统焦面移动所引起的波面像差小于 $\lambda/4$ 时,光学系统的成像质量仍然是可以接受的.由此,可以推导出光学系统焦面位置移动的许可范围,该范围就是光学系统的焦深.本系统的焦深 DOF 为

$$\text{DOF} = k_2 \lambda / \text{NA}^2 = 1.2 \mu\text{m} \quad (10)$$

式中 k_2 是焦深工艺因子,通常取 $k_2 = 1$.

4 结论

实验表明,对于使用 DMD 作周期结构的无掩模光刻,其成像过程应该使用阿贝成像原理进行解释,而不是一直以来认为的几何光学成像.本文利用此方法成功制作了最小周期为 900 nm 的二维周期结构,并证明了要在周期结构中引入精细结构(如缺陷)则必须收集更多的衍射级用于恢复精细结构.本实验提供了一种高效、灵活、快速、低成本的亚微米周期结构的无掩模制备方法。

致谢:感谢中山大学梁冰博士与刘忆琨博士提供的样品以及化学处理方面的帮助。

参考文献

- [1] CAMPBELL M, SHARP D N, HARRISON M T, *et al.* Fabrication of photonic crystals for the visible spectrum by holographic lithography[J]. *Nature*, 2000, **404**(6773): 53-56.
- [2] XIE X S, LI M, GUO J, *et al.* Phase manipulated multi-beam holographic lithography for tunable optical lattices[J]. *Opt Express* 2007, **15**: 7032-7037.
- [3] SCHELLENBERG F M. A history of resolution enhancement technology[J]. *Opt Rev*, 2005, **2**(2): 83-89.
- [4] RAJESH M, AMIL P, DARIO G, *et al.* Maskless lithography [J]. *Materialstoday*, 2005, **8**(2): 26-33.
- [5] KIM S M, KIM D, KANG S. Replication of micro-optical components by ultraviolet-molding process[J]. *J Microlith, Microfab, Microsyst*, 2003, **2**(4): 356-359.
- [6] ERDMANN L, DEPARNAY A, MASCHKE G, *et al.* MOEMS-based lithography for the fabrication of micro-optical components[C]. *SPIE*, 2004, **5347**: 79-84.
- [7] GUO Xiao-wei, DU Jing-lei, LUO Bo-liang, *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.
- [8] LIU Chi, GUO Xiao-wei, GAO Fu-hua, *et al.* Imaging simulation of maskless lithography using a DMD[C]. *SPIE*, 2005, **5645**: 307-314.
- [9] CHIAO Jung-Chih, CHEN Xu-yuan, ZHOU Zhao-ying, *et al.* Design of maskless lithography system based on DMD[C]. *SPIE*, 2007, **6836**.
- [10] DU Xin-rong. Design of maskless lithography image system based on DMD[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2008: 39-42.
杜欣荣.基于DMD的数字无掩模光刻成像系统设计[D].西安:西安理工大学, 2008: 39-42.
- [11] CHEN Jin-song. Non-mask lithograph technology for manufacturing diffractive micro-optical devices [J]. *Micronanoelectronic Technology*, 2006, **7**: 351-354.
陈劲松.用于衍射微光学元件制备的无掩模光刻技术[J]. *微纳电子技术*, 2006, **7**: 351-354.
- [12] SUN C, FANG N, WU D M, *et al.* Projection micro-stereolithography using digital micro-mirror dynamic mask [J]. *Sensors and Actuators A*, 2005, **121**(1): 113-120.
- [13] WEI Tao, ZHU Jian-hua, CHEN Li-gong, *et al.* Digital holographic display based on digital micromirror device and quality enhancement of its reconstructed image [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(5): 952-956.
魏涛,朱建华,陈立功,等.基于DMD的数字全息显示及其再现像质增强[J]. *光子学报*, 2008, **37**(5): 952-956.
- [14] SONG Qing-he, LI Jun-chang, GUI Jin-bin, *et al.* Influence of digital holograph zoom on DMD Reconstruction display [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(5): 1187-1191.
宋庆和,李俊昌,桂进斌,等.全息图像缩放对数字微镜重建显示的影响研究[J]. *光子学报*, 2009, **38**(5): 1187-1191.
- [15] BORN M, WOLF E. Principles of optics[M]. YANG Jia-sun, transl. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2005: 387-391.
玻恩 M, 沃尔夫 E. 光学原理[M]. 杨葭孙, 译. 北京: 电子工业出版社, 2005: 387-391.

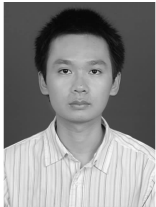
Submicron-sized Optical Fabrication with DMD Based Lithography

LU Jin-hong, XIE Xiang-sheng, ZHANG Pei-qing, ZHOU Jian-ying

(State Key Laboratory of Optoelectronic Materials and Technologies, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China)

Abstract: Digital Micromirror Device (DMD) is employed as spatial light modulator to construct a digital maskless lithography system, which can be used to fabricate micro-nano photonic device conveniently. The imaging process of the periodic structure in the coherence light is analyzed. According to the numerical simulation and experimental result, the imaging process should be explained by the principle of Abbe's imaging. With this system, 2D periodic structure with the period of 900 nm is fabricated but defect is introduced. So DMD is a practical tool to fabricate submicron-sized pattern.

Key words: Interference lithography; Fourier optics; Micro-nanophotonic device; Principle of Abbe's imaging; Digital Micromirror Device(DMD)



LU Jin-hong was born in 1984. Now he is pursuing his M. S. degree in optical engineering, and his research interests focus on digital lithography, micronano photonic device and optical, mechanical and electronic integration.



ZHOU Jian-ying was born in 1957. He obtained the Ph. D. degree from Imperial College, London in 1988. Now he is a professor and Doctoral Supervisor, and his research interests focus on holography lithography, micronano photonic device, 3D display and optical, mechanical and electronic integration.