

## 基于 X 光移动光刻技术的 PMMA 微透镜阵列制备

李以贵<sup>1</sup>, 颜平<sup>1</sup>, 黄远<sup>1</sup>, 杉山进<sup>2</sup>

(1. 上海应用技术大学理学院, 上海 201418; 2. 日本立命馆大学微系统系, 日本京都 525-8577)

**摘要:** 微透镜阵列的制备已经成为微光学领域的研究热点。利用两次 X 光移动光刻技术, 以聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)为正光刻胶, 在 PMMA 基板上制造了微透镜阵列, 并对其制作原理进行了详细说明。设计了制备微透镜阵列用的掩膜图形, 并通过掩膜图形模拟仿真, 预测了微透镜在两次移动曝光显影后的形状。第一次 X 光移动光刻后, 理论上会得到半圆柱状三维结构; 第一次光刻后将掩膜板旋转 90°, 进行第二次移动曝光光刻, 最终在 PMMA 基板上制备了面积为 10 mm×10 mm 的 30×30 个微透镜阵列, 阵列中每个微透镜的直径约 248 μm、厚度约 82 μm。同时也研究了 X 光曝光量与 PMMA 刻蚀深度之间的关系。微透镜阵列形貌测试表明此种制备微透镜阵列的新方法是可行的。

**关键词:** 微透镜阵列; 微制造; X 光光刻; 移动光刻; PMMA

中图分类号: TN256; TN305.7 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA201645.0620001

## Fabrication of PMMA micro lens array based on X-ray moving lithography

Li Yigui<sup>1</sup>, Yan Ping<sup>1</sup>, Huang Yuan<sup>1</sup>, Sugiyama Susumu<sup>2</sup>

(1. School of Science, Shanghai Institute of Technology, Shanghai 201418, China;

2. Department of Micro Systems, Ritsumeikan University, Kyoto 525-8577, Japan)

**Abstract:** Fabrication of micro lens arrays has been a research hotspot in the area of micro optics. By using two X-ray moving lithography, the polymethyl methacrylate (PMMA) as the positive photoresist, the micro lens array was manufactured on PMMA plate, and its fabrication principle was described in detail. The related mask pattern for fabricating micro lens arrays was designed. Through designed mask patterns simulation, the shape of the actual micro lens could be predicted. After the first moving X-ray lithography, theoretically the semi-circular columnar micro 3D structure was formed on the PMMA substrate. If the mask mounted vertically was rotated 90° after the first X-ray lithography and the second X-ray lithography was carried out, eventually the 30×30 micro lens array was obtained on the 10 mm×10 mm PMMA substrate, the diameter of each micro lens was about 248 μm, the depth was about 82 μm. The relationships between the amount of X light exposure and the depth of PMMA etching was studied. The micro lens array profile measurement shows that the new method for the fabrication of micro lens array is proved to be feasible.

**Key words:** micro lens array; micro fabrication; X-ray lithography; moving lithography; PMMA

收稿日期: 2015-10-11; 修订日期: 2015-11-27

基金项目: 国家自然科学基金(51035005); 上海应用技术学院光电精密检测平台建设项目(10210Q140005);

上海应用技术学院引进人才启动基金(YJ2014-03)

作者简介: 李以贵(1965-), 男, 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事微光机电系统、微光学元器件制备工艺等方面的研究。

Email: ygli@sit.edu.cn

## 0 引言

光学成像透镜,作为光学系统的重要元件之一,在天文、军事、交通、医学、艺术等领域扮演着重要角色。随着科技的进步和发展,光学系统体积逐渐向小型化和集成化方向发展,体积较大、结构较复杂的传统透镜已不满足要求,而缩小透镜尺寸而制备出微透镜和微透镜阵列顺应了光学系统集成化发展潮流。随机微透镜阵列可实现光束的分割和叠加,使得光束匀化<sup>[1]</sup>,也可实现仿复眼光学的大视角与多景深的全景成像<sup>[2]</sup>,还可提高有机电致发光二极管的取光效率<sup>[3]</sup>等功能,具有巨大的发展前景。

微透镜一直以来都是微光学的研究热点。张新宇等人<sup>[4]</sup>利用离子束溅射刻蚀的方法制作出长方状拱形石英微透镜阵列,该微透镜表面处的陷坑的平均半径在 1 μm 以下。朱维安等人<sup>[5]</sup>采用 KOH:H<sub>2</sub>O 的湿法化学腐蚀 Si<100>晶片制作出球面轮廓曲线较好的微透镜,透镜直径可从几个微米到几个毫米,焦距和孔径之比  $f/D$  可从 2.5~10。王贞福等人<sup>[6]</sup>在 GaAs 衬底上采用限制扩散湿法刻蚀技术制作出不同直径的微透镜,对于直径 200 μm 的微透镜,其表面粗糙度为 12.56 nm,曲率半径为 959.86 μm,对应焦距为 369.18 μm。王伟等人<sup>[7]</sup>利用软模压印技术制备出表面形貌均匀、聚焦性能良好、光强均匀的微透镜阵列。侯丽雅等人<sup>[8]</sup>采用按需喷射的液滴发生器将紫外固化聚合物滴在不同湿润条件的疏水表面,并用紫外灯固化制备出均匀性高的微米级透镜阵列,此方法能够制备出直径为 25 μm、直径变异系数  $C·V$  达 0.64%、焦距均匀性误差为 1.7% 的 15×15 的微透镜阵列。

基于 MEMS 工艺的微加工方法具有工艺尺寸小,便于集成加工,而 MEMS 工艺中的 LIGA 工艺<sup>[9]</sup>在小型化与微型化的光学器件方面又有自己的独到之处。LIGA 工艺是 MEMS 三大工艺之一,它利用 X 光光刻,可以制造具有高深宽比的亚微米级的三维结构<sup>[10-11]</sup>。X 光的产生过程是:当加速电子的行进速度接近光速时,具有高能量的电子在电磁力作用下产生弯曲,同时沿弯曲曲率的切线处产生强大的电磁波辐射。该电磁波波段是在 X 光波段。X 光波长越短,电子能量越高。X 光光源可根据实验用途的不同,其 X 光波段范围是可以调节的。X 光具有极强

的方向性和极高的亮度,可用于 X 光光刻。由于 X 光没有背面散射,因此利用 X 光光源制造高分辨率的微器件,对基板材料、曝光的方式和曝光的环境要求不太苛刻。

文中利用两次移动 X 光光刻技术,制备了 PMMA 微透镜阵列。第一次 X 光移动曝光后,形成半圆柱状的微结构;将掩模板旋转 90°,进行第二次移动曝光并显影后,在 PMMA 基板上可获得微透镜阵列。

## 1 微透镜制备的基本原理

微透镜阵列的制造工艺采用移动 X 光光刻技术。移动光刻需要:光源(X 光光束)、X 光光刻掩模板、X 光光刻胶(PMMA 基板)和 X 光移动曝光台等。X 光光源是利用日本立命馆大学的同步辐射光源(AURORA),X 光波长范围为 0.15~0.35 nm,峰值波长为 0.4 nm。X 光光刻掩模板由吸收体、支撑膜和框架三个主要部分组成,其中吸收体包含要转写到光刻胶的图形信息。高原子数(如金)的材料吸收 X 射线,而低原子数(如 Polyimide)的材料透过 X 射线。这里使用的掩模板的吸收体金(Au)的厚度为 3 μm,支撑膜(Polyimide)厚度为 38 μm,框架为四英寸铝框架。PMMA 不仅具有优良的透光性,而且当 X 光照射后由于其分子链被打断,PMMA 在 GG 显影液中的溶解性增大,因此非常适合作为 X 光光刻胶,可直接用于制作微透镜阵列。

利用 X 光移动曝光制备微透镜阵列的原理图如图 1 所示。光刻前,分别将 X 光光刻掩模板和 1 mm

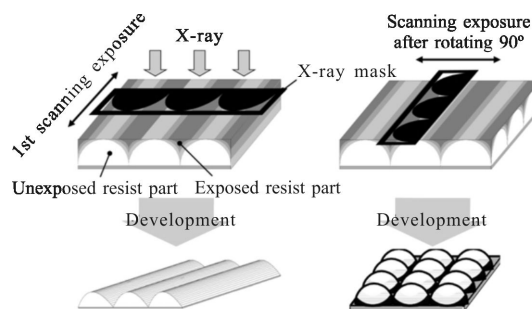


图 1 微透镜阵列制备原理图

Fig.1 Fabrication principle of the micro lens array

厚、分子量为 950 的 PMMA 基板安装到如图 2 所示的 X 光移动曝光平台上。X 光掩模板具有半圆形图案的金吸收体(图 1 中黑色部分的图形),在掩模板

的下面放置 PMMA 基板作为正光刻胶,并通过移动 PMMA 基板进行 X 光曝光,曝光部分的 PMMA 高分子材料在显影液中溶解,得到图 1 左下角的半圆柱状三维结构。如果第一次曝光后,掩膜板旋转 90°,进行第二次曝光,PMMA 被曝光部分在显影液中被溶解了,得到图 1 右下角的球冠状微透镜阵列。利用此曝光技术,最终可获得 PMMA 微透镜阵列。

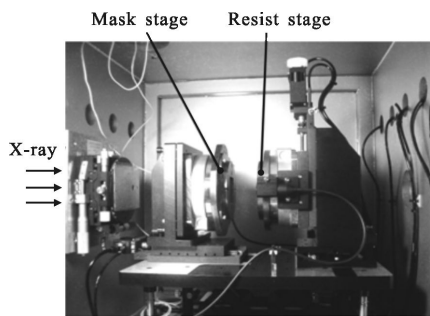


图 2 X 光移动光刻平台

Fig.2 Exposure stage for X-ray moving lithography

X 光移动曝光移动平台由掩膜板用 X-Y-Z 三轴移动平台、光刻胶用 X-Y-Z 三轴移动平台以及伺服机构组成。移动平台的移动速度为 2~20 mm/s,最大移动距离 50 mm。移动平台的速度均匀性小于 ±5%,平台旋转角度为 0~90°。

图 3 为制备微透镜所用的掩膜图形及预计的 PMMA 微透镜形状。从上到下分别为:金吸收层半圆掩膜图形;移动 X 光曝光后,PMMA 光刻胶上的 X 光曝光能量分布图;以及 GG 显影液显影后的 PMMA 微透镜图形。其中,掩膜板半圆最高点部分在移动曝光后始终未受到 X 光曝光,其 PMMA 上能量分布图为零,显影后仍然保留有 PMMA 光刻胶。

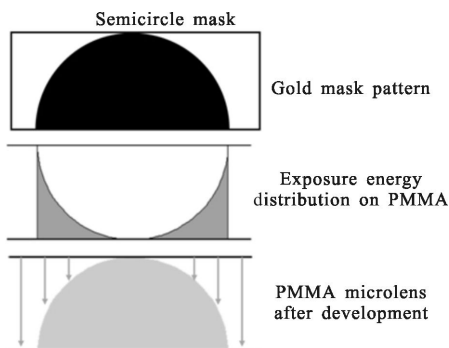


图 3 制备微透镜所用的掩膜图形及预计的 PMMA 微透镜形状  
Fig.3 Micro lens mask pattern and the predicted profile of PMMA micro lens

## 2 设计与仿真

表 1 给出了采用不同的掩膜图形,利用移动曝光技术制备微透镜的仿真结果以及剖视图。表中从上到下表示,掩膜板图形(即金吸收体图形)分别为直径 250 μm 的半圆形,长半轴为 500 μm、短半轴为 250 μm 的半椭圆形,以及直径为 250 μm、球冠高度为 80 μm 的球冠形状时,中间分别对应两次移动曝光光刻后的仿真结果图,右边分别对应其剖视图。如果制备 30×30 个直径为 250 μm 的微透镜阵列,至少需要 10 mm×10 mm 的 PMMA 基板。从表 1 中的仿真结果的剖视图可以看出:利用半球形掩膜图形,制备的微透镜离顶部 25~125 μm 的球冠作为透镜是有效的;利用半椭圆形掩膜图形,制备的微透镜离顶部 37.5~125 μm 的球冠作为透镜是有效的;而利用球冠掩膜图形,制备的微透镜离顶部 18.7~125 μm 的球冠作为透镜是有效的。因此,其他不能用作透镜的高度需要加以避开。

表 1 掩膜板图形及其仿真结果

Tab.1 Mask pattern and simulation results

Mask pattern	Simulation result	Cutaway view

## 3 实验结果与讨论

用 X 光移动曝光法将 X 光掩膜板上的图案转

移到 PMMA 上, X 光移动曝光量为  $0.05 \text{ A}\cdot\text{h}$ 。曝光后, 在  $37\text{ }^\circ\text{C}$  的 GG 显影液中显影  $30 \text{ min}$ , 再用  $37\text{ }^\circ\text{C}$  的纯净水清洗  $10 \text{ min}$ 。GG 显影液的成分比是: 20% 的六原子环化合物、5% 的胺、60% 的乙二醇醚和 15% 的水。图 4 为曝光量与 PMMA 刻蚀深度的关系图, 其中实线为显影时间为  $1 \text{ h}$  的结果; 虚线为显影时间为  $6 \text{ h}$  的结果。从图中可以看出, 当曝光量为  $0.17 \text{ A}\cdot\text{h}$  时, 显影时间为  $1 \text{ h}$  的刻蚀深度为  $292 \mu\text{m}$ ; 显影时间为  $6 \text{ h}$  的刻蚀深度为  $875 \mu\text{m}$ 。

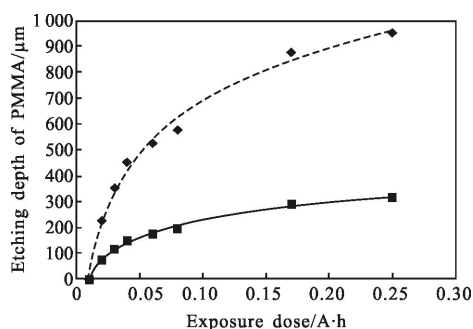
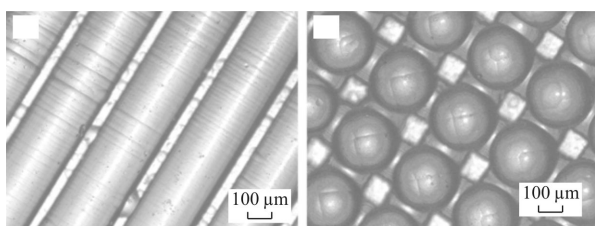


图 4 曝光量与 PMMA 刻蚀深度的关系图

Fig.4 Exposure dosage vs etching depth PMMA

图 5 为实际制备的 PMMA 微透镜阵列的光学显微图像。图 5(a)为第一次曝光显影后的 PMMA 半圆柱状三维结构, 图 5(b)为两次曝光并显影后的 PMMA 球冠状微透镜阵列。形貌测试结果表明, 微透镜阵列中每个微透镜单元形貌大小相近, 一致性好, 制造出的单一 PMMA 微透镜的直径约为  $248 \mu\text{m}$ , 球冠高度约为  $82 \mu\text{m}$ 。



(a) 第一次曝光显影后的 PMMA (b) PMMA 微透镜阵列  
(a) PMMA after development for first exposure (b) PMMA micro lens array

图 5 制备的 PMMA 微透镜阵列的光学显微图像

Fig.5 Optical image of fabricated PMMA micro lens array

## 4 结论

利用两次 X 光移动曝光技术在 PMMA 基板上制备了微透镜阵列结构, 并对其制作原理进行了详

细说明。第一次 X 光移动光刻后, 将掩膜板旋转  $90^\circ$ , 进行第二次 X 光移动光刻, 最终获得了  $30\times 30$  个微透镜阵列。实验结果表明, 制造出单一微透镜直径为  $248 \mu\text{m}$ , 球冠高度约为  $82 \mu\text{m}$  的 PMMA 微透镜阵列。从形貌测量中证明了 X 光移动曝光技术在微透镜阵列的实际制作上是可行的, 该制备方法的优点是工艺简单可靠, 一致性好。仿真结果与制备的微透镜阵列为下一步将要进行的微透镜性能进行评测与优化奠定了基础。利用聚二甲基硅氧烷(PDMS)转模技术, 可以大规模复制出低成本微透镜阵列, 这对于微透镜阵列走向实用具有极其重要的意义。

## 参考文献:

- [1] Cao Axiu, Shi Lifang, Yu Jinqing, et al. Laser beam homogenization method based on random microlens array [J]. *Applied Laser*, 2015, 35(1): 124-128. (in Chinese)  
曹阿秀, 史立芳, 余金清, 等. 基于随机微透镜阵列的激光光束匀化方法[J]. *应用激光*, 2015, 35(1): 124-128.
- [2] Xing Qiang, Dai Zhendong, Wang Hao. Research progress on artificial visual system inspired by compound eye[J]. *Optical Instruments*, 2013, 35(3): 89-94. (in Chinese)  
邢强, 戴振东, 王浩. 仿生眼视觉系统的研究进展[J]. *光学仪器*, 2013, 35(3): 89-94.
- [3] Zhong Kejun, Gao Yiqing. Applications of microlens arrays for light extraction enhancement in OLED[J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2014, 35(1): 1-4. (in Chinese)  
钟可君, 高益庆. 微透镜阵列在提高 OLED 取光效率中的应用[J]. *半导体光学*, 2014, 35(1): 1-4.
- [4] Zhang Xinyu, Yi Xinjian, Zhao Xingrong, et al. Study on Ion beam etching fabrication for SiO<sub>2</sub> microlens array [J]. *Optics and Precision Engineering*, 1997, 5(5): 63-68. (in Chinese)  
张新宇, 易新建, 赵兴荣, 等. 微透镜阵列的离子束溅射刻蚀研究[J]. *光学精密工程*, 1997, 5(5): 63-68.
- [5] Zhu Wei'an, Huang Youshu, Zhong Xianxin. A experimental research on silicon micromirror arrays made by chemical etching [J]. *Optics and Precision Engineering*, 1998, 6(2): 65-70. (in Chinese)  
朱维安, 黄友恕, 钟先信. 化学腐蚀法制造硅微透镜阵列的实验研究[J]. *光学精密工程*, 1998, 6(2): 65-70.
- [6] Wang Zhenfu, Ning Yongqiang, Zhang Yan, et al. Fabrication of GaAs microlens by using diffusion-limited wet etching [J]. *Journal of Optoelectronics·Laser*, 2009, 20

- (6): 709–712. (in Chinese)  
王贞福, 宁永强, 张岩, 等. 利用限制扩散湿法刻蚀法制作 GaAs 微透镜[J]. 光电子·激光, 2009, 20(6): 709–712.
- [7] Wang Wei, Zhou Changhe. New technology for fabrication of polymer microlens arrays [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2009, 36(11): 2869–2872. (in Chinese)  
王伟, 周常河. 一种新型聚合物微透镜阵列的制造技术 [J]. 中国激光, 2009, 36(11): 2869–2872.
- [8] Zhu Xiaoyang, Hou Liya, Zheng Yue, et al. Fabrication of polymer micro-lens array by micro-fluid digitalization [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 22(2): 360–368. (in Chinese)  
朱晓阳, 侯丽雅, 郑悦, 等. 微流体数字化技术制备聚合物微透镜阵列[J]. 光学 精密工程, 2014, 22(2): 360–368.
- [9] Ehrfeld W, Lehr H. Deep X-ray lithography for the production of 3D microstructures [J]. *Radiat Phys Chem*, 1995, 45(3): 349–365.
- [10] Li Yigui, Sugiyama Susumu. Fabrication of microgratings on PMMA plate and curved surface by using copper mesh as X-ray lithography mask [J]. *Microsystem Technologies*, 2007, 13(3–4): 227–230.
- [11] Fumiki Kato, Shinya Fujinawa, Yigui Li, et al. Fabrication of high aspect ratio nano gratings using SR lithography [J]. *Microsystem Technologies*, 2007, 13(3–4): 221–225.