

文章编号: 0253-2239(2010)06-1792-04

# 变折射率球面六角形孔径平面微透镜阵列

蒋小平<sup>1,2</sup> 刘德森<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> 苏州大学物理科学与技术学院, 江苏 苏州 215006; <sup>2</sup> 西南大学物理科学与技术学院, 重庆 400715)

**摘要** 提出了一种制作收集光信息视角范围大、光信息利用效率高、具有良好抗外界应力及温度变化能力的曲面微透镜阵列的新方法。采用光刻离子交换工艺,通过对镀钛掩膜、光刻和离子交换等关键工艺的研究和严格控制,在球面玻璃基片上制作了六角形孔径平面微透镜阵列。制作的阵列单元透镜六角形边长 0.173 mm,窗口间距 0.200 mm,单片阵列上微透镜元 2052 个。测试表明,离子交换深度 0.198 mm,阵列填充率达到 98%,阵列成像性能优良,光学均匀性好,旋转椭球状的单元透镜区域折射率呈三维梯度变化,截距、数值孔径自中心向边缘渐变,半径相同处光学性能一致性好。

**关键词** 集成光学;球面微透镜阵列;离子交换;填充率;六角形孔径

中图分类号 O435.1 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20103006.1792

## Fabrication of Gradient Refractive Index Hexagonal Aperture Planar Microlens Array Based on Spherical Substrate

Jiang Xiaoping<sup>1,2</sup> Liu Desen<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> School of Physical Science and Technology, Soochow University, Suzhou, Jiangsu 215006, China)  
(<sup>2</sup> School of Physical Science and Technology, Southwest University, Chongqing 400715, China)

**Abstract** A novel method of fabricating a convex microlens array with wide scope for collecting optical information and transferring it with high efficiency and excellent capabilities of withstanding external stress and temperature is presented. By lithography and ion-exchange, a hexagonal aperture planar microlens array is fabricated on a spherical glass substrate successfully under strict control of the crucial process such as coating titanium, photolithography and ion-exchange etc. There are 2052 microlens in the substrate and each one is with a length of side and an edge-to-edge interval of 0.173 mm and 0.200 mm, respectively. Measurement and test show that the ion-exchange depth is 0.198 mm, the fill factor of the array reaches 98%, and the array has significant characteristics including perfect imaging, fine optical uniformity, ion-exchanged rotation-ellipsoidal region with three-dimensional refractive index profile, intercept and numerical aperture varying from center to edge and well conforming optical performance at same radius.

**Key words** integrated optics; spherical microlens array; ion-exchange; fill factor; hexagonal aperture

## 1 引 言

随着光电信息技术的快速发展,微透镜阵列在光纤通信、光信息处理和光传感技术等领域中发挥着越来越重要的作用<sup>[1~10]</sup>。与平面微透镜阵列相比,曲面微透镜阵列具有收集光信息视角范围大、时

间分辨率高等昆虫复眼的特性,在军事、医疗和航天技术等领域有重要的应用。为了提高光信息传输效率,还要求微透镜阵列具有更高的填充率。提高填充率的有效手段则是模拟昆虫复眼模型,改进传统的圆形孔径,制作异形(正方形或六角形)孔径

收稿日期: 2009-08-10; 收到修改稿日期: 2009-11-09

基金项目: 国家自然科学基金(60978046)和西南大学发展基金(SWUF2007027)资助课题。

作者简介: 蒋小平(1973—),男,博士研究生,讲师,主要从事微小光学方面的研究。E-mail: jungxp@163.com

导师简介: 刘德森(1937—),男,教授,博士生导师,主要从事微小光学、变折射率光学与集成光学等方面的研究。

E-mail: liuds37@126.com(中国光学学会会员号:S040111156M)

微透镜元的微透镜阵列。目前制作弯曲微透镜阵列的方法主要有溶胶-凝胶法、刻蚀法、模压法和光刻热熔法等,材料通常是树脂和玻璃等均匀折射率介质<sup>[1~10]</sup>。

本文在对平面型六角形孔径平面微透镜阵列研究的基础上<sup>[11,12]</sup>,进一步采用光刻离子交换工艺在球面玻璃基片上制作六角形孔径平面微透镜阵列。这种微透镜阵列具有折射率呈三维梯度分布、抗外界应力和温度变化能力强、光学性能稳定、成像质量高、阵列光学均匀性好和填充率高等优点,可以模仿昆虫复眼的某些光学性能。

## 2 阵列的制作

阵列制作的主要工艺流程如图 1 所示。

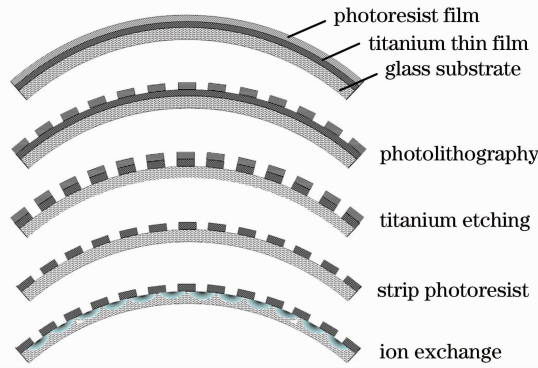


图 1 微透镜阵列制作工艺流程

Fig. 1 Fabricating process of the microlens array

阵列基片采用 Na<sub>2</sub>O 含量较高的玻璃进行双面抛光制成,内外球面顶点严格重合,两球面间距均匀,球面曲率半径为 500 mm。在基片曲率半径较大的情况下,仍选用六角形窗口的平面负型曝光模板,单元窗口边长为 0.173 mm,窗口间距为 0.200 mm,如图 2 所示。

选取纯度为 99.995% 的钛靶,用等离子体磁控溅射工艺,在球面玻璃基片凸面镀上约 1 μm 厚的

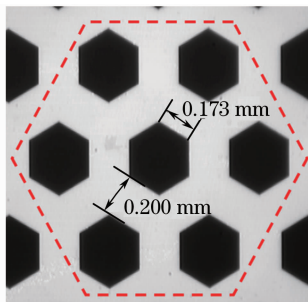


图 2 负型模板(局部)

Fig. 2 Negative mask(part)

钛膜。为使钛膜致密并与基片结合牢固,镀膜前采用多种溶剂分步超声清洗法。由于离子束溅射时曲面比平面镀膜均匀性差,中间较高部分膜层生长较慢,因此镀膜采用多次溅射法,可避免钛膜出现漏光小孔。

涂胶采用三档旋涂法,转速分别为 15, 40 和 50 r/s,时间分别为 30, 40 和 45 s,在基片凸面得到厚度约为 1 μm 的表面光滑的胶层。再用 120 °C 温度烘烤 5 min,可将光刻胶牢固地粘附在钛膜上。然后进行曝光、显影,再次烘烤,得到有六角形窗口图案的光刻成品,如图 3(a) 所示。再用氢氟酸和高氯酸混合液进行钛膜腐蚀,并去胶,得到有掩膜的离子交换窗口,如图 3(b) 所示。腐蚀中要特别注意,窗口钛膜必须全部腐蚀,但又不能腐蚀过度。因为未腐蚀尽的窗口钛膜会影响离子扩散的对称性,而腐蚀过度会严重破坏窗口外玻璃基片表面光洁度,最终影响透镜光学性能。

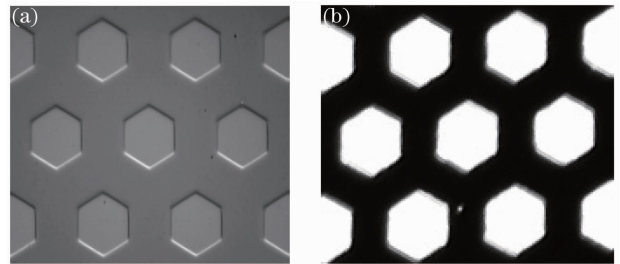


图 3 光刻、腐蚀窗口图案

Fig. 3 Pattern of lithography and etching

将腐蚀后的基片放入以一定按比例混合的 Ti<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 和 ZnSO<sub>4</sub> 熔融盐中进行离子交换,交换温度为 450 °C~500 °C,时间为 20~30 h。此前,先进行了最佳离子交换时间的测试研究,最终选取离子交换区域略有重叠时为最佳离子交换时间。

## 3 阵列光学性能测试

制作的六角形孔径球面微透镜阵列外形如图 4 所示,基片直径 25 mm,有效微透镜元数为 2052,阵列排列整齐、均匀(空白处为镀膜压片痕)。

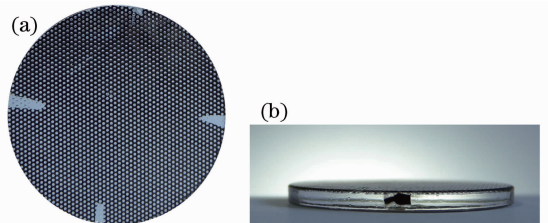


图 4 阵列外形。(a)俯视图;(b)侧视图

Fig. 4 Array profile. (a) top view, (b) side view

图 5 为阵列对物“A”和方格子图通过 CCD 视觉系统的成像及畸变情况,阵列成像清晰,畸变较小。通过成像测试,透镜元焦点均在透镜外,物通过透镜成倒立实像。

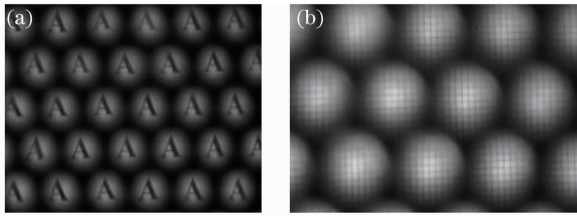


图 5 物“A”的阵列成像(a)和方格子成像(b)畸变  
Fig. 5 Imaging of object “A” (a) and distortion of square grids (b) through the array

表 1 为阵列基片上沿直径方向透镜元抽样测量截距、数值孔径和畸变值。由表 1 可看出,微透镜阵列截距自中心至边缘逐渐变小,数值孔径自中心向边缘逐渐变大,这是与相应平面微透镜阵列的不同之处,也是其他工艺所难以实现的。其畸变为桶形畸变。由于光刻所用掩模板是平面的,且窗口大小相同、分布均匀,因此对曲面基片来说,越往阵列外围窗口形变越大,是产生畸变的重要原因。但由于基片曲率较大(500 mm),从表 1 可看出,阵列畸变总体上较小,约为 5%,且最大畸变 5.6%在最外围。

表 1 沿半径方向透镜元截距、数值孔径及畸变  
Table 1 Data of pitch, NA and distortion along radius of the array

	Intercept /mm	NA	Distortion
1	1.880	0.104	0.056
2	2.010	0.085	0.022
3	2.085	0.095	0.041
4	2.230	0.085	0.038
5	2.290	0.085	0.041
6	2.570	0.076	0.032
7	2.465	0.076	0.038
8	2.270	0.076	0.032
9	2.120	0.085	0.020
10	2.070	0.095	0.024
11	2.015	0.095	0.022
Avg	2.182	0.087	0.033

表 2 为阵列基片上距中心半径为 8 mm 的圆周上透镜元抽样测量截距、数值孔径和畸变值。由表 2 可以看出,在半径相同处阵列透镜元的截距、数值孔径和畸变一致性良好,说明阵列具有良好的光学均匀性。

表 2 半径为 8 mm 的圆周上的透镜元截距、数值孔径及畸变

Table 2 The pitch, NA and distortion of the lens units along the circum which radius is 8 mm

	Intercept /mm	NA	Distortion
1	2.030	0.098	0.017
2	2.055	0.098	0.033
3	2.045	0.093	0.027
4	2.100	0.098	0.017
5	2.020	0.088	0.033
6	2.090	0.098	0.032
7	2.060	0.102	0.036
8	2.075	0.102	0.023
9	2.115	0.102	0.032
10	2.035	0.098	0.019
11	2.070	0.093	0.025
Avg	2.063	0.097	0.027

将阵列沿与透镜元光轴平行的方向(即横截面)切开并研磨抛光,可观察到半椭圆状的离子交换区域剖面,如图 6(a),(b)所示。在高温下,当将含  $\text{Na}^+$  较高的有六角形窗口阵列的掩膜基片放入含  $\text{Tl}^+$  的熔融盐后,窗口就相当于一个点源,以六角形窗口为边界,  $\text{Na}^+$  和  $\text{Tl}^+$  将以不同的速率向各方向进行相互扩散。由于  $\text{Na}^+$  和  $\text{Tl}^+$  电极化率、离子半径的显著差异,玻璃中原有的离子浓度均匀分布规律逐渐被打破,呈现出向各方向离子浓度以不同的梯度分布。随着离子交换时间的增加,玻璃中的离子交换区域将进一步变大,并逐渐由旋转椭球变化为接近于半球形,进而相邻离子交换区域开始重叠。图 3(c)为在显微镜下观察到的离子交换区域三维形貌,为近似旋转椭球状<sup>[6,7]</sup>。

选取的离子交换深度为两相邻透镜元刚好有少

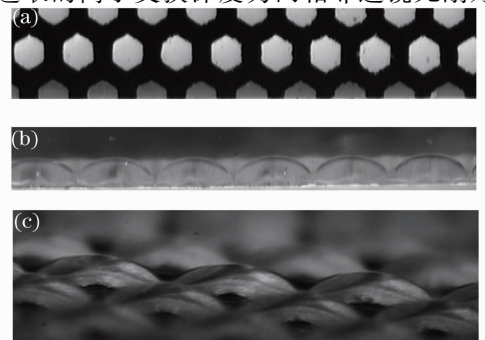


图 6 阵列切口位置(a)、离子交换区域纵剖面(b)及三维离子交换区域侧俯视图(c)

Fig. 6 Incision location (a), section of ion-exchange region (b) and lateral view of three-dimensional ion-exchange region of the array (c)

量重叠。经测量和计算,离子纵向扩散最大深度为 0.198 mm,横向(自六角形窗口边界算起)扩散最大宽度为 0.142 mm,重叠区域最大宽度为 0.042 mm。因相邻三个透镜元最邻近顶点构成等边三角形,由离子扩散的深度、宽度值可计算得出,此时三角形区域全部发生了离子交换,因而镀钛膜的玻璃基片表面均为离子交换区域,即其表面离子扩散区域达 100%。由于透镜元边缘出现重叠,透镜元之间的空隙几乎为零,因此,微透镜阵列的填充率可达 98%。

## 4 结 论

光刻离子交换工艺是一种重要的光学微加工工艺,在制作微透镜阵列中有特殊的应用。通过对镀膜、光刻和离子交换等关键工艺的研究和控制,采用光刻离子交换法制作出单片透镜元数目达 2052 个、成像质量优良的六角形孔径球面微透镜阵列,微透镜阵列基片曲率半径为 500 mm,六角形窗口边长 0.173 mm,窗口间距 0.200 mm,微透镜阵列成像性能优良,光学均匀性好,透镜元区域折射率呈三维梯度变化,截距、数值孔径自中心向边缘渐变,半径相同处光学性能一致,阵列填充率达 98% 以上。

## 参 考 文 献

- 1 Zhan Zhenxian, He Jianhui, Yao Haitao *et al.*. Aspherical liquid micro-lens manipulated by electrostatic forces[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(2): 361~364  
詹珍贤,何建慧,姚海涛等. 电场作用下的变焦非球面液滴微透镜[J]. *光学学报*, 2008, **28**(2): 361~364
- 2 Du Chunlei, Lin Dajian, Feng Boru *et al.*. Microlens array fabrication by using laser direct lithography system [J]. *Acta Optica Sinica*, 1996, **16**(8): 1194~1196

- 杜春雷,林大键,冯伯儒等. 激光直接光刻制作微透镜阵列的方法研究 [J]. *光学学报*, 1996, **16**(8): 1194~1196
- 3 Zhang Xinyu, Tang Qingle, Zhang Zhi *et al.*. Concave refractive microlens arrays fabricated by ion beam etching [J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(4): 485~490  
张新宇,汤庆乐,张智等. 凹折射微透镜阵列的离子束刻蚀制作 [J]. *光学学报*, 2001, **21**(4): 485~490
- 4 Zhou Ping, Lu Wei, Lin Yuxiang *et al.*. Fly eye lens array used in liquid crystal projection display with high light efficiency [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(5): 587~591  
周平,陆巍,林宇翔等. 复眼透镜提高液晶投影照明系统的能量利用率 [J]. *光学学报*, 2004, **24**(5): 587~591
- 5 Zheng Jianzhou, Yu Qingxu, Lu Yongjun *et al.*. Improved lens arrays optica system with controllable focus width for uniform irradiation[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(3): 331~336  
郑建洲,于清旭,卢永军等. 聚焦可调的透镜阵列均匀辐照光学系统[J]. *中国激光*, 2007, **34**(3): 331~336
- 6 J. Duparre', P. Dannberg, P. Schreiber *et al.*. Artificial apposition compound eye fabricated by micro-optics technology [J]. *Appl. Opt.*, 2004, **43**(22): 4305~4310
- 7 D. Radtke, J. Duparr', U. D. Zeitner *et al.*. Laser lithographic fabrication and characterization of a spherical artificial compound eye[J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(6): 3067~3077
- 8 D. M. Hartmann, O. Kibar, S. C. Esener. Characterization of a polymer microlens fabricated by use of the hydrophobic effect [J]. *Opt. Lett.*, 2000, **25**(13): 975~977
- 9 Senyeu Yang, Fangsung Cheng, Shuwen Xu *et al.*. Fabrication of microlens arrays using UV micro-stamping with soft roller and gas-pressurized platform [J]. *Microelectron. Engng.*, 2008, **85**: 603~609
- 10 M. Fritze, M. B. Stern, P. W. Wyatt. Laser-fabricated glass microlens arrays[J]. *Opt. Lett.*, 1998, **23**(2): 141~143
- 11 Liu Desen, Gao Yingjun, Zhu Chuangui *et al.*. Fabrication and characterization of gradient index planar microlens array [J]. *High Technol. Lett.*, 1996, **4**: 35~39  
刘德森,高应俊,朱传贵等. 自聚焦平面微透镜阵列的制作及其基本特性[J]. *高技术通讯*, 1996, **4**: 35~39
- 12 Zhang Yu, Liu Desen. Manufacture of hexagon aperture plane microlens array and its basic characteristics [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(8): 1639~1642  
张 玉,刘德森. 六角形孔径平面微透镜阵列的制作及基本特性研究[J]. *光子学报*, 2008, **37**(8): 1639~1642