

引用格式: XIE Yimunan, JIANG Xiaoping, ZHOU Sumei, et al. Effect on the Optical Properties of Planar Microlens Arrays with Different Ion-exchange Time[J]. Acta Photonica Sinica, 2022, 51(1):0151121

谢意木男, 蒋小平, 周素梅, 等. 离子交换时间对平面微透镜阵列的透镜元光学特性的影响[J]. 光子学报, 2022, 51(1):0151121

离子交换时间对平面微透镜阵列的透镜元光学特性的影响

谢意木男, 蒋小平, 周素梅, 袁哲

(西南大学 物理科学与技术学院 微纳结构光电子学重庆市重点实验室, 重庆 400715)

摘要:采用光刻离子交换工艺制作了半径不同的圆形孔径变折射率平面微透镜阵列,在离子交换过程中分6个时段取样,测量不同开孔大小的变折射率平面微透镜阵列的离子交换深度、宽度和透镜元的焦距、畸变、数值孔径,发现离子交换宽度和深度之比随着离子交换时间增长而减小,在 z 方向和 r 方向的离子平均扩散速率逐渐减小,且开孔半径小的变折射率平面微透镜阵列减小得更快;随着离子交换时间增长,两种孔径的变折射率平面微透镜阵列的焦距逐渐变短,且开孔半径小的焦距相对更短;不同开孔半径的变折射率平面微透镜阵列的数值孔径随着离子交换时间增长而变大,其畸变随着离子交换时间增长而减小。变折射率平面微透镜阵列的光学特性随离子交换时间而改变的规律,为不同光学系统中所需的变折射率平面微透镜阵列的制作提供参考。

关键词:集成光学;平面微透镜阵列;离子扩散;焦距;数值孔径;畸变

中图分类号:O435.1

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20225101.0151121

0 引言

平面微透镜阵列是掩埋于平板玻璃基片表面下,由几何尺寸一致、折射率按一定规律呈三维渐变(Gradient Index, GRIN)的若干微透镜元组成的平面阵列^[1-2]。制作 GRIN 平面微透镜阵列的方法有热压印技术^[3]、离子束刻蚀^[4]、光刻胶热熔法^[5]等。这些方法各自有着一定的优点和局限性:热压印技术的图形复制准确度高,但脱模过程复杂;离子束刻蚀的微透镜表面微结构形貌好,但生产成本较高且生产效率较低;光刻胶热熔法的制作工艺简单,但热稳定性较差、容易老化。光刻离子交换法^[6]是一种应用较为广泛的微透镜阵列制作方法,这种工艺的精度可以达到分子量级。采用光刻离子交换法制作 GRIN 平面微透镜阵列的制备过程相对简单,制作出来的透镜元的尺寸可小于 10 μm ,焦距可小于 0.1 mm,厚度可小于 0.1 mm,并且阵列结构及其成像均匀性好,在人工智能、便携仪器设备、集成成像和三维成像、光束匀化和整形等要求小尺寸阵列光学元件的领域得到越来越广泛的应用^[7-10]。YUAN Di 等^[11]将微透镜阵列与闪烁体结合,用来提高闪烁体的光输出量和控制光输出方向。YU Yinchuan 等^[12]在共焦显微镜光学系统中,将微透镜阵列置于入射光路中,以此缩短显微镜的扫描时间,并且显微镜所成的像可以达到亚微米空间分辨率。CHEN Linyi 等^[13]利用 UV 胶印工艺对设计好的三维微图形进行复制,将复制的图形与微透镜阵列相结合,实现裸眼 3D 显示效果。

使用光刻离子交换法制作的 GRIN 平面微透镜阵列的光学特性主要会受到其内部折射率分布的影响,而内部的折射率分布与基底玻璃成分、熔盐离子性质、掩膜窗口的形状及大小、离子交换的时间和温度等因

基金项目:重庆市基础与前沿研究计划项目(No.cstc2013jcyjA00016),中央高校基本业务费专项资金(No.XDJK2016C123),横向项目(No.4412100284)

第一作者:谢意木男(1993—),女,硕士研究生,主要研究方向为微小光学。Email:695047917@qq.com

导师(通讯作者):周素梅(1976—),女,副教授,博士,主要研究方向为微光学及应用等方面。Email:sumeizhou@163.com

收稿日期:2021-09-07;**录用日期:**2021-10-25

<http://www.photon.ac.cn>

素密切相关^[14]。在之前的研究工作中,涉及了两种离子交换型的GRIN平面微透镜^[15],研究了不同形状的掩膜窗口的离子扩散特性等,但尚未进行离子交换时间对GRIN平面微透镜阵列光学特性影响的研究。本文实验分析了解到离子交换时间对于GRIN平面微透镜阵列的焦距、数值孔径、成像质量等光学特性的影响尤为明显,因此研究离子交换时间对GRIN平面微透镜阵列的光学特性的影响具有重要应用价值,同时对于制备需要满足相关光学特性(如焦距、数值孔径)的GRIN平面微透镜阵列有参考意义。

1 离子扩散理论

本文采用开孔式离子交换工艺制作GRIN平面微透镜阵列,所使用的掩模板是窗口区域为无掩膜的透明小圆孔,与熔盐离子进行交换的开孔通常为圆形。一般情况下,GRIN平面微透镜阵列的开孔相对于透镜元的尺寸来说较小,因而离子交换过程可近似视为点源扩散问题,满足点源扩散方程^[14]

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial c}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} = \frac{1}{D} \frac{\partial c}{\partial t} \quad (1)$$

式中, c 为交换离子浓度, D 为离子扩散系数(假设它与离子浓度无关)。设 C_0 为扩散界面处熔盐离子的质量浓度, a 为开孔半径, r, z 为柱坐标,则通过离子交换初始条件求解点源扩散方程可得到

$$C(r, z) = \frac{2C_0}{\pi} \arcsin \frac{2a}{\sqrt{(r-a)^2 + z^2} + \sqrt{(r+a)^2 + z^2}} \quad (2)$$

式(2)为扩散后的离子浓度分布方程,熔盐离子通过开孔向 r 轴和 z 轴扩散。在开孔附近,由于因子 a 的影响,其等折射率分布曲线是扁平的。经过一定时间的离子交换后,其内部离子浓度分布关于 z 轴旋转对称。由式(2)可知,GRIN平面微透镜阵列的折射率不仅与径向坐标有关,还与轴向坐标有关^[16]。若GRIN平面微透镜阵列的开孔半径为0.300 0 mm,玻璃基底的折射率为1.526 2。设折射率分布为

$$n^2(r, z) = n^2(0, 0) [1 - (\sqrt{A} r)^2 - \nu_{20} (\sqrt{A} z)^2] \quad (3)$$

式中, \sqrt{A} 为折射率分布常数, ν_{20} 为折射率分布系数, \sqrt{A} 和 ν_{20} 均为与玻璃基底、熔盐离子及交换条件有关的常数。根据参考文献^[16],选取 $\sqrt{A} = 0.494 0 \text{ mm}^{-1}$, $\nu_{20} = 5.600 0$ 时,可以得到如图1所示模拟的离子浓度分布曲线。

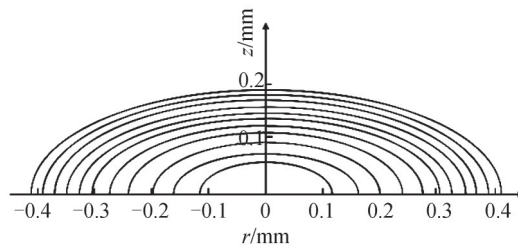


图1 根据测量数据的计算机模拟折射率分布曲线

Fig. 1 Computer simulation of refractive index distribution curve based on measured data

从图1可知,当离子交换时间很短时,离子交换过程只在开孔附近进行,等离子浓度分布曲线是扁平的;经过一定时间的离子交换,当离子交换深度 z 大于 $6.3a$ 时,等浓度分布曲线是一系列的同心圆^[14]。

2 平面微透镜的制作工艺与光学特性

2.1 制作工艺

采用光刻离子交换工艺制作GRIN平面微透镜阵列的工艺流程主要分为光刻、蚀刻、离子交换三步。

1) 光刻与蚀刻

其具体制备工艺流程如图2所示。首先选择合适的玻璃基底,为了保护玻璃基片不被腐蚀液腐蚀,同时在离子交换过程中保护不需要进行离子交换的部分,在其一面用溅射法均匀镀上钛膜,然后通过旋转涂覆法在钛膜上匀涂光刻胶(本文使用负胶),再用设计好的掩模板进行曝光,通过显影和定影后,可在光刻胶涂层上形成与掩模板图形一致的圆形开孔图案,经烘箱烘烤后,用钛膜腐蚀液进行开孔蚀刻,得到离子交换开

孔阵列,最后去胶。

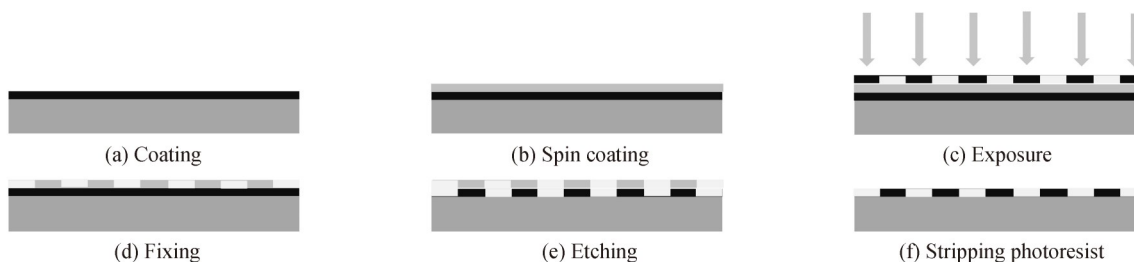


图2 主要工艺流程示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the main process flow

2) 离子交换

将蚀刻并去胶后的玻璃基片放在坩埚电阻炉中进行离子交换。在离子交换过程中,使用含 Tl_2SO_4 的混合盐,先将混合盐熔化,然后将开孔的一面朝下放进熔盐里,基片恰好可以漂浮在熔盐上。开孔的那一面会和熔盐离子进行离子交换,而另一面因暴露在空气中则不会发生变化。 Tl^+ 通过开孔在玻璃基片中扩散的示意图如图3所示。

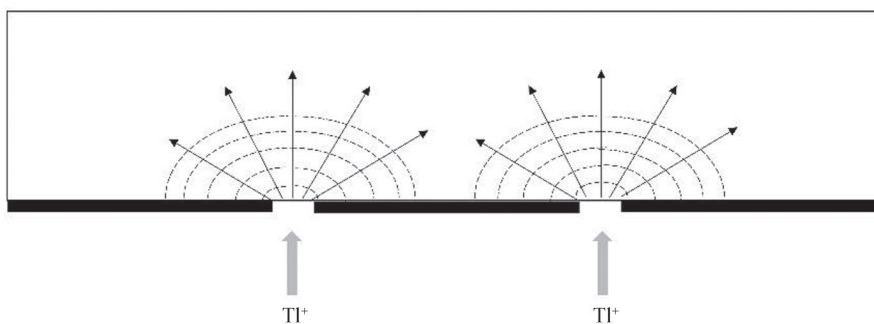


图3 离子通过开孔向玻璃内扩散示意图

Fig. 3 Schematic diagram of ion-diffusion into glass through openings

2.2 光学特性

2.2.1 GRIN平面微透镜的光线轨迹方程

入射光线平行于光轴时,若 $\nu_{20} > 0$,光线轨迹方程为

$$r = r_0 \cos \left\{ \frac{1}{\sqrt{\nu_{20}}} \left[\arcsin \frac{\sqrt{\nu_{20}} \sqrt{A} z}{\sqrt{1 - (\sqrt{A} r_0)^2}} \right] \right\} \quad (4)$$

若 $\nu_{20} < 0$,光线轨迹方程为

$$r = r_0 \cos \left\{ \frac{1}{\sqrt{-\nu_{20}}} \left[\arcsin \frac{\sqrt{-\nu_{20}} \sqrt{A} z}{\sqrt{1 - (\sqrt{A} r_0)^2}} \right] \right\} \quad (5)$$

式(4)和式(5)都是光线平行于光轴入射时GRIN平面微透镜的光线轨迹方程^[17]。

2.2.2 焦距

在近轴近似条件下,GRIN平面微透镜的焦距公式可以简化为^[15]

$$f = \frac{\sqrt{1 - 2\Delta}}{\sqrt{A}} \cot \left(\frac{\sqrt{A} a}{\sqrt{2\Delta}} \arcsin \sqrt{2\Delta} \right) \quad (6)$$

式中, $\Delta = \frac{n^2(0,0) - n_2^2}{2n^2(0,0)}$ 为相对折射率差, $n(0,0)$ 为球中心折射率, n_2 为玻璃基底的折射率。式(6)说明

GRIN平面微透镜阵列的焦距与折射率分布常数 \sqrt{A} 、半径 a 和相对折射率差 Δ 有关,而且是呈余切函数的关系。对于同一GRIN平面微透镜阵列来说,折射率分布常数 \sqrt{A} 和相对折射率差 Δ 是确定的,当半径 a 随着离子交换时间增长而变大时,焦距 f 则在变短。

3 实验测试与分析

实验中,使用C01型和C02型掩模板制作了两种不同孔径的GRIN平面微透镜阵列,它们的窗口形状都是圆形,窗口半径以及相邻窗口中心距如表1所示。根据图2所示的制备工艺流程,在镀有钛膜的玻璃基片上制作出开孔阵列,然后放入坩埚电阻炉中进行离子交换。

表1 两种掩模模板图形的几何结构参数
Table 1 The geometric structure parameters of the two mask template patterns

Number	Hole radius/mm	Center distance/mm
C01	0.25	1.60
C02	0.15	0.96

离子交换过程中,对C01型和C02型基片分时间段依次取样6次,离子交换温度为490℃。C01型样品的离子交换时间分别为8、10、12、14、16、18小时,C02型分别为3、4、5、6、7、8小时。离子交换时间的选取主要是根据课题组前期进行离子交换试测的结果而确定的,本文主要测量和研究不同孔径和不同离子交换时间的开孔阵列的离子交换深度与宽度以及微透镜元的焦距、数值孔径和畸变。

3.1 离子交换深度与宽度

将进行离子交换后的GRIN平面微透镜阵列沿透镜元的光轴切开并抛光,通过显微镜可以观察到熔盐离子扩散进入玻璃基片表面以下的分布区域的交换情况。离子交换深度是指熔盐离子沿 z 轴扩散的距离,离子交换宽度是指熔盐离子沿 r 轴扩散的距离。在高倍显微镜下拍摄经不同离子交换时间、两种孔径的GRIN平面微透镜阵列的截面及对字母“A”所成的像,如图4~5所示。

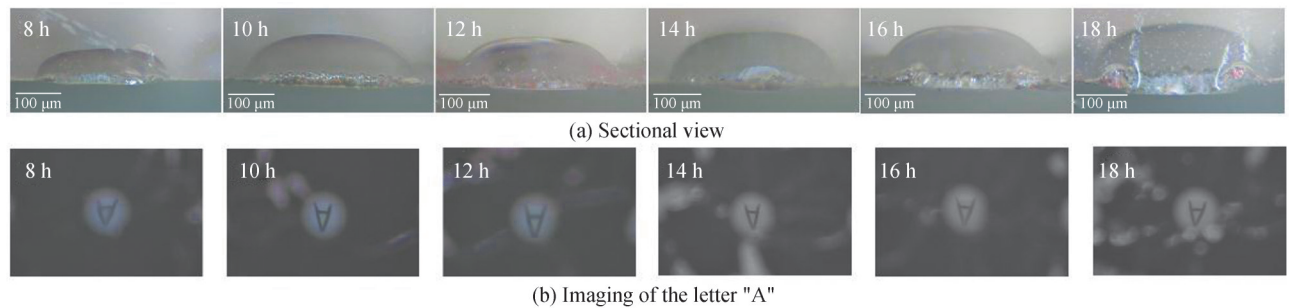


图4 C01型GRIN平面微透镜阵列离子交换区域截面及对字母“A”的成像
Fig. 4 Cross section of ion-exchange area of typed C01 microlens array and imaging of letter "A"

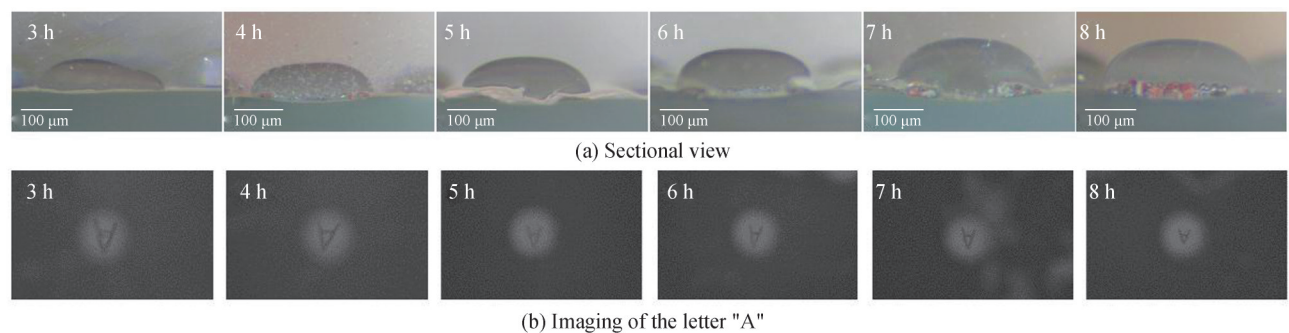


图5 C02型平面微透镜阵列离子交换区域截面及对字母“A”的成像
Fig. 5 Cross section of ion-exchange area of typed C02 microlens array and imaging of letter "A"

测量发现,两种交换孔径的GRIN平面微透镜阵列的离子交换深度和宽度均随着离子交换时间的增加而变深、变宽。再通过进一步计算得到GRIN平面微透镜阵列的离子交换宽度与深度之比在逐渐减小。相同离子交换时间下,开孔半径大的离子交换宽度与深度之比更大。结果如表2~3所示。

表2 C01型微透镜阵列离子交换宽度与深度之比

Table 2 Ion-exchange width and depth ratio of typed C01 microlens array

Time/h	8	10	12	14	16	18
w_1/mm	0.787	0.820	0.873	0.915	0.952	0.971
h^1/mm	0.192	0.219	0.243	0.255	0.269	0.300
w_1/h_1	4.099	3.744	3.593	3.588	3.539	3.237

表3 C02型微透镜阵列离子交换宽度与深度之比

Table 3 Ion-exchange width and depth ratio of typed C02 microlens array

Time/h	3	4	5	6	7	8
w_2/mm	0.450	0.481	0.517	0.554	0.578	0.617
h_2/mm	0.105	0.131	0.150	0.166	0.186	0.211
w_2/h_2	4.286	3.672	3.447	3.337	3.108	2.924

离子平均扩散速率是由离子扩散距离与发生这一距离所用时间之比得到的。两种开孔大小的GRIN平面微透镜阵列的离子平均扩散速率与时间图像及拟合结果如图6所示。它们在同一方向上的离子平均扩散速率与时间图像及拟合结果如图7所示。

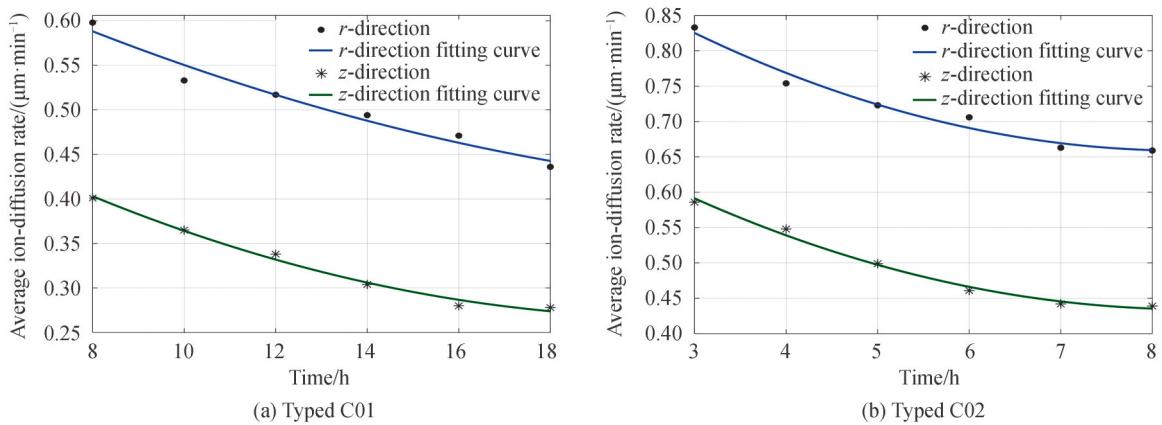


图6 GRIN平面微透镜阵列离子平均扩散速率
Fig. 6 Average ion-diffusion rate of GRIN planar microlens array

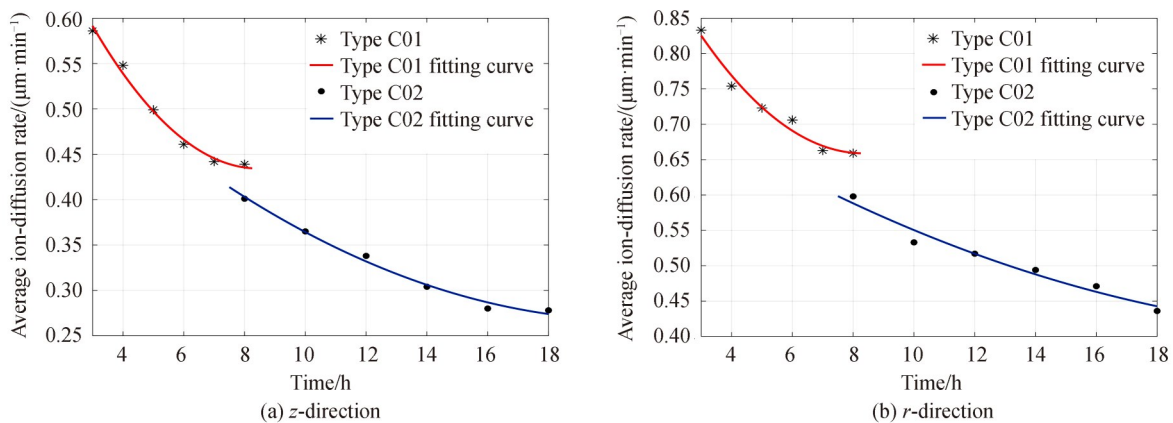


图7 C01型和C02型GRIN平面微透镜阵列z方向和r方向离子平均扩散速率
Fig. 7 Average ion-diffusion rate of the typed C01 and typed C02 plane microlens array in the z-direction and r-direction

由图6可知,不同开孔半径的GRIN平面微透镜阵列,在 r 方向和 z 方向的离子平均扩散速率在逐渐变小,并且离子平均扩散速率在 r 方向上减小得更快。由图7可知,开孔半径小的GRIN平面微透镜阵列在 z 方向和 r 方向的离子平均扩散速率都要减小得更快。离子平均扩散速率减小主要是受到开孔大小以及离子浓度差的影响。

3.2 微透镜阵列的焦距测量

采用成像法对3个成像质量好的透镜元进行测量。首先在CCD相机里观察到清晰的透镜像,然后调整透镜到物的距离,直到看到透镜成的清晰的像,最后利用数显读数显微镜读出结果,得到透镜元的焦距 F 。测试原理图如图8所示,最终测量结果如图9所示。

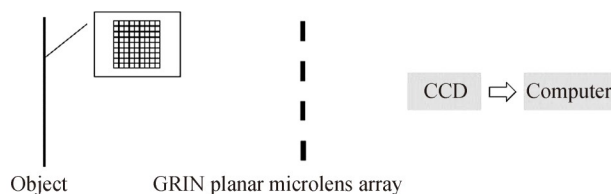


图8 测试原理示意图

Fig. 8 Schematic diagram of test principle

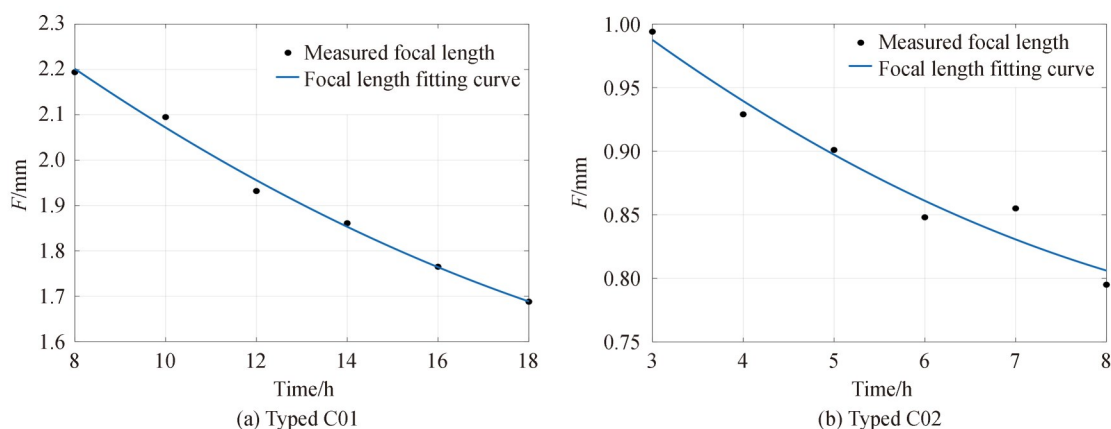


图9 GRIN平面微透镜阵列焦距与时间关系图

Fig. 9 The focal length vs. time diagram GRIN planar microlens array

C01型GRIN平面微透镜阵列的透镜元的直径 D 为0.500 mm,离子交换时间分别为8、10、12、14、16、18小时,其对应的焦距分别为2.194、2.095、1.932、1.861、1.765、1.688 mm。C02型GRIN平面微透镜阵列的透镜元的直径 D 为0.300 mm,离子交换时间分别为3、4、5、6、7、8 h,其对应的焦距分别0.994、0.929、0.901、0.848、0.855、0.795 mm。从图9可以看出两种孔径的平面微透镜阵列的焦距均在随着离子交换时间的增加而变短;经相同离子交换时间,微透镜阵列的开孔半径小的,焦距更短。

3.3 数值孔径(NA)与畸变

数值孔径是用来描述GRIN平面微透镜聚光能力的物理量,是GRIN平面微透镜的一个重要参数。数值孔径通常用NA表示,其值等于透镜端面所处媒介的折射率 n_0 和透镜最大视场角的正弦值 $\sin\theta$ 的乘积,数学表达式为

$$NA = n_0 \cdot \sin \theta \quad (7)$$

畸变是GRIN平面微透镜像差的一种,分为桶形畸变和枕形畸变。实验过程中,在透镜的一端放置一张等间距的方格纸(间距为2 mm),然后通过CCD观察另一端所成的像。测量中心方格的间距为 d_0 以及边缘方格的间距 d ,则GRIN平面微透镜的畸变量可以用 D 表示为

$$D = (d - d_0) / d_0 \quad (8)$$

当 $D > 0$ 时,为枕形畸变;当 $D < 0$ 时,为桶形畸变。

使用成像法对 GRIN 平面微透镜阵列的数值孔径和畸变进行测试,如图 10 所示,测试结果如表 4~5 所示。

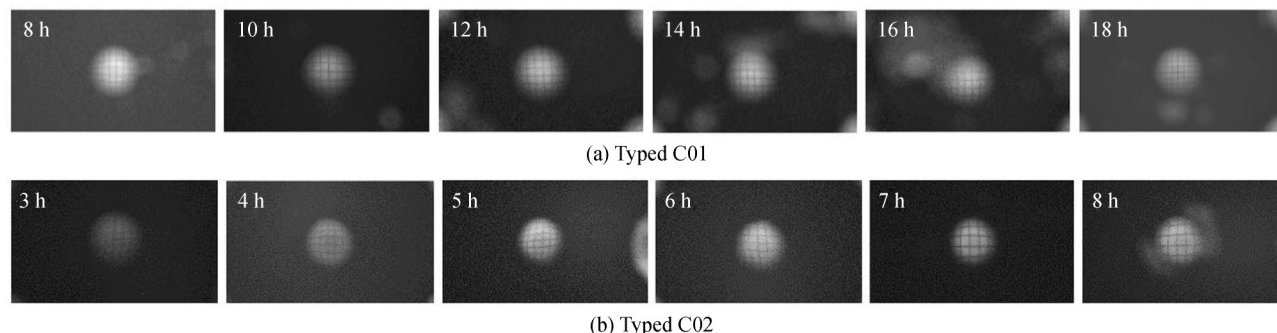


图 10 GRIN 平面微透镜阵列对方格纸的成像图
Fig. 10 Imaging of quadrille paper from GRIN planar microlens array

表 4 C01 型微透镜阵列的数值孔径及畸变

Time/h	8	10	12	14	16	18
NA	0.255	0.279	0.278	0.316	0.348	0.387
Distortion	-0.172	-0.087	-0.082	-0.083	-0.064	-0.104

表 5 C02 型微透镜阵列的数值孔径及畸变

Time/h	3	4	5	6	7	8
NA	0.289	0.331	0.383	0.394	0.409	0.412
Distortion	-0.181	-0.146	-0.135	-0.138	-0.122	-0.095

从表 4~5 可以看出,两种孔径的平面微透镜列的数值孔径都在随着离子交换时间的增长而变大。孔径小的平面微透镜阵列经过较短的离子交换时间,能获得更大的数值孔径。不同开孔半径的平面微透镜阵列,其畸变都随着离子交换时间的增长而变小。

对图 6~7 及表 2~3 中测量的实验数据进行分析可知,不同窗口半径的 GRIN 平面微透镜阵列的离子交换深度、宽度在随着离子交换时间的增长而变深、变宽,而离子的平均扩散速率随着离子交换时间的增长而减小。从图 9 以及表 4~5 可知,焦距、数值孔径及畸变都会随着离子交换时间的变化而变化。离子交换深度和宽度随离子交换时间增长而变深、变宽时,它的焦距也在变短,与对式(6)的分析一致。

4 结论

采用光刻离子交换法,通过控制不同离子交换时间制作了两种不同孔径的 GRIN 平面微透镜阵列。经测量和分析发现,两种不同孔径的 GRIN 平面微透镜阵列经过一定的离子交换时间均能成像,但不同离子交换时间下的平面微透镜阵列所成的像又有所不同。两种孔径的平面微透镜的焦距都在随着离子交换时间的增长而变短,且窗口半径小的微透镜阵列的焦距比窗口半径大的微透镜阵列的焦距短。不同开孔直径的平面微透镜阵列的数值孔径随离子交换时间增长而变大,畸变随离子交换时间增长而变小。在实际应用中,可以根据不同光学系统的需要,通过控制离子交换时间、选择不同的开孔半径制作出所需的 GRIN 平面微透镜阵列。

参考文献

- [1] LIU Desen, GAO Yingjun, ZHU Chuangui, et al. Fabrication and characterization of gradient index planar microlens array [J]. Chinese High Technology Letters, 1996, 6(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, 6(4): 35-39.
- [2] JIANG Xiaoping, LIU Desen. Ion-diffusion characteristics of two kinds of planar GRIN microlens array with high fill-factor and different aperture[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(4): 0413001.

- 蒋小平, 刘德森. 两种开孔的高填充率GRIN平面微透镜阵列离子扩散特性[J]. 光学学报, 2013, 33(4): 0413001.
- [3] ONG Nanshing, KOH Yeowhwee, FU Yongqi. Microlens array produced using hot embossing process[J]. Microelectronic Engineering 60(3): 365-379.
- [4] 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.
- [5] POPOVIC Z D, SPRAGUE R A, NEVILLE CONNELL G A. Technique for monolithic fabrication of microlens arrays [J]. Applied Optics, 1988, 27(7): 1281-1284.
- [6] OIKAWAI M, IGA K, SANADA T. Array of distributed-index planar micro-lenses prepared from ion-exchange technique [J]. Japanese Journal of Applied Physics, 1981, 20(4): 296-298.
- [7] LI Suning, ZHU Yanlong, ZHANG Chuanxin, et al. Rectification of images distorted by microlens array errors in plenoptic cameras[J]. Sensors, 2018, 18(7): 2019.
- [8] ZHONG Kejun, FU Yanjun, JIANG Guangyu. Improvement in light out-coupling efficiency of OLED by using high fill factor parabola curve microlens arrays[J]. Optik-International Journal for Light and Electron Optics, 2020, 212(2020): 164604.
- [9] LI Dan, ZHANG Baolong, ZHU Jiawei. Illumination optics design for DMD pico-projectors based on generalized functional method and microlens array[J]. Journal of the European Optical Society-Rapid Publications, 2019, 15(1): 1-9.
- [10] LIU Qingyun, LIU Haichun, LI Deyang. Microlens array enhanced upconversion luminescence at low excitation irradiance [J]. Nanoscale, 11(29): 14070-14078.
- [11] YUAN Di, LIU Bo, ZHU Zhichao, et al. Directional control and enhancement of light output of scintillators by using microlens arrays[J]. ACS Applied Materials Interfaces, 2020, 12(26): 29473-29480.
- [12] YU Yinchuan, YE Xianjun, MCCIUSKEY M. Confocal microscopy with a microlens array[J]. Applied Optics, 2020, 59(10): 3058-3063.
- [13] CHEN Linyi, CHEN Guangxue, LIAO Liyu, et al. Naked-eye 3D display based on microlens array using combined micro-nano imprint and UV offset printing methods[J]. Molecules, 2020, 25(9): 2012.
- [14] 刘德森. 微小光学与微透镜阵列[M]. 北京: 科学出版社, 2013: 182-185.
- [15] GAO Yingjun, QIN Yali. Two gradient-index microlenses made by ion exchange method[J]. Acta Optica Sinica, 1990, 10(1): 60-66.
高应俊, 覃亚丽. 两种离子交换型变折射率微透镜[J]. 光学学报, 1990, 10(1): 60-66.
- [16] ZHU Chuangui, XUE Wuqiu, LIU Desen, et al. The index distribution and imaging property of planar microlenses[J]. Laser Technology, 1992, 16(4): 218-224
朱传贵, 薛鸣球, 刘德森, 等. 自聚焦平面微透镜的折射率分布及成像特性[J]. 激光技术, 1992, 16(4): 218-224.
- [17] LIU Desen, HU Jianming, LIU Wei, et al. Studies on the optical properties of planar intersect microlens arrays [J]. Chinese Journal of Lasers, 2005, 32(6): 743-748
刘德森, 胡建明, 刘伟, 等. 平面交叉型微透镜阵列的制作及成像特性研究[J]. 中国激光, 2005, 32(6): 743-748.

Effect on the Optical Properties of Planar Microlens Arrays with Different Ion-exchange Time

XIE Yimunan, JIANG Xiaoping, ZHOU Sumei, YUAN Zhe

(Chongqing Key Laboratory of Micro&Nano Structure Optoelectronics, School of Physical Science and Technology, Southwest University, Chongqing 400715, China)

Abstract: The plane microlens array is a plane array that is buried under the surface of the flat glass substrate, which consists of several microlens elements with uniform geometric dimensions and a three-dimensional gradient of refractive index according to a certain rule. There are many methods for making GRIN planar microlens arrays, including hot embossing technology, ion beam etching, the melted photoresist method, and so on. Each of these methods has certain advantages and limitations. The hot embossing technology has high pattern reproduction accuracy, but the demolding process is complicated. Using ion beam etching to fabricate microlens has good surface microstructure, but the production cost is high and production efficiency is low. The melted photoresist method has a simple manufacturing process, but the planar microlens array made by this method has poor thermal stability and is prone to aging. The

fabrication process of GRIN planar microlens array using ion-exchanging method is relatively simple. The size of the lens element fabricated by ion-exchanging method can be less than 10 μm , the focal length can be less than 0.1 mm, and the thickness can be less than 0.1 mm. Moreover, the array structure and imaging uniformity are good. It has been widely used in artificial intelligence, portable equipment, integrated imaging, three-dimensional imaging, beam homogenization, beam shaping and other fields that require small-sized array optical elements. In this paper, circular aperture gradient index plane microlens arrays with different diameters are fabricated by ion-exchange technology and photolithography. By sampling in 6 time intervals during the ion-exchange process, the ion-exchanging depth and width of microlenses with different aperture sizes, the focal length, distortion and numerical aperture of lens elements were measured. The ratio of ion-exchange width to depth decreases with the increase of ion-exchange time, and the average diffusion rate of ions in the z -direction and r -direction gradually decreases. Moreover, that decreases faster for the flat microlens array with small opening diameter. As the ion-exchanging time increases, the focal lengths of the microlens arrays with two apertures gradually become shorter, and the focal lengths of the smaller aperture diameters are relatively shorter. The numerical aperture of the planar microlens arrays with different aperture diameters increases while the ion-exchange time increases, and its distortion decreases with the increase of ion exchange time. The rule that the optical characteristics of the gradient index planar microlens array changes with the ion-exchange time provides a reference for the production of the planar microlens array required in different optical systems.

Key words: Integrated optics; Planar microlens array; Ion-diffusion; Focal length; Numerical aperture; Distortion

OCIS Codes: 130.3120; 220.3630; 220.4610