

doi:10.3788/gzxb20174602.0222004

一种大 F 数微透镜阵列的制备方法

刘鑫^{1,2}, 张满¹, 史立芳¹, 曹阿秀¹, 邓启凌^{1,2}

(1 中国科学院光电技术研究所, 成都 610209)

(2 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要:针对大 F 数(大于 10)微透镜阵列难以制备的现状,提出了一种制备大 F 数微透镜阵列的方法。首先采用传统光刻胶热熔法及刻蚀技术制作出成形的微透镜阵列,再将一层具有较高粘滞系数的光刻胶均匀地涂覆在该微透镜阵列上,在光刻胶的粘滞作用以及烘烤过程中光刻胶自身表面张力的共同作用下,微透镜阵列的 F 数得到提高。采用该方法制备的二氧化硅微透镜阵列的 F 数达 40,与传统大 F 数微透镜阵列的加工方法相比,该方法简便易行、制备的微透镜阵列面形良好,且只需调节光刻胶的粘滞系数,即可获得 F 数不同的微透镜阵列。

关键词:微透镜阵列;大 F 数;光刻胶;粘滞性;表面张力;表面形貌检测;面形控制

中图分类号:TN205

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2017)02-0222004-6

Fabrication Method for the Microlens Array of High F -number

LIU Xin^{1,2}, ZHANG Man¹, SHI Li-fang¹, CAO A-xiu¹, DENG Qi-ling^{1,2}

(1 Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China)

(2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: In the view of the present problem that the microlens array of high F -number (more than 10) is difficult to be manufactured, this paper proposed a new fabrication method for it. Firstly, A photoresist layer with high viscosity was spin-coated evenly on a microlens array fabricated by melting photoresist and etching technology. Under the viscosity of photoresist and the surface tension of photoresist in curing process, the F -number of microlens array increased observably. Compared with the traditional processing method, this fabrication method is very simple and the surface profile of microlens array is very good. In addition, microlens arrays with different F -number could be obtained with the viscosity of photoresist was adjusted. Based on the method, a microlens array with F -number up to 40 was fabricated. The experimental results show that the profile of the microlens array is good enough to verify the feasibility of the fabrication method.

Key words: Microlens array; High F -number; Photoresist; Viscosity; Surface tension; Surface profile measurement; Surface profile control

OCIS Codes: 220.3620; 110.5220; 120.5710; 220.4000; 240.3990

0 引言

微光学元件,具有微型化、轻量化、阵列化、集成化等优点,被广泛应用于荧光发射增强^[1]、阵列匀光^[2]、阵列光刻^[3]、Shack-Hartmann 波前传感器^[4]、光存储^[5]、光纤耦合^[6]、焦平面集光^[7]、光通信^[8]和集成成像^[9]等领域。

目前,微透镜阵列的制作方法主要有光刻胶热熔法^[10-12]、光敏玻璃成形法^[13]、离子交换法^[14-16]、飞秒激

基金项目:国家自然科学基金(No. 61505214)和中国科学院青年创新促进会资助

第一作者:刘鑫(1991-),男,硕士研究生,主要研究方向为微纳结构制备技术. Email:676612082@qq.com

导师(通讯作者):邓启凌(1973-),女,高级工程师,硕士,主要研究方向为微纳光学. Email:dengqiling@ioe.ac.cn.

收稿日期:2016-08-15;录用日期:2016-09-28

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

光加工法^[17]、模压成型法^[18]、喷墨印刷^[19]等方法. 其中,光刻胶热熔法是现阶段应用最广泛,制作最方便的一种微透镜阵列制作方法^[20]. 其原理是将光刻胶圆柱阵列加热至熔融状态,在表面张力的作用下圆柱结构转变为光滑的球冠状结构. 但是并非任意直径、高度的圆柱体热熔后都能形成良好的球面形,能否形成球面以及球面的形状是由光刻胶与基底的浸润程度决定. 光刻胶与基底材料的浸润程度决定了热熔成形后微透镜的球面轮廓与基底之间的夹角,即临界接触角. 由于临界接触角的存在,当胶层厚度不足时,热熔后的光刻胶不能形成球面,而会形成类似“帽子”形状的结构,这使得光刻胶热熔法制备微透镜阵列的面形曲率的成形范围大大受限,不能形成比较“平坦”的球面形. 因此要获得大 F 数(大于 10)的微透镜阵列很困难^[21].

为了提高微透镜的 F 数,国内外学者提出了很多方法. Z. D. Popovic 提出了改变光刻胶与基底材料的方法^[22],即通过选择不同的光刻胶或基底材料,形成具有不同浸润程度的界面;许乔等提出了阶梯光刻热熔法^[23],即对于光刻胶曝光不足的情况,经显影后在基底上将残留一层未曝光的光刻胶膜;任智斌等提出了缩短显影时间法^[24],即当显影不充分时,光刻胶存在底部连接的现象;Rui Bian 等提出了利用负胶制作长焦距微透镜的方法^[25],即利用未被曝光的负胶热熔先形成长焦距的凹透镜阵列,再倒模复制出凸透镜阵列;Hsiang-Chun Wei 等提出了 SU-8 胶自组装法^[26],即利用 SU-8 胶曝光后亲水性的提高,在稀释的负胶溶液中可自组装形成长焦距微透镜阵列. 前三种方法对 F 数的提高不明显,使用这些方法 F 数最大仅能达到 10;后两种方法制备过程复杂、可重复性较差,且获得的微透镜阵列均匀性不好,光学性能难以满足实用性要求.

本文提出了一种制备大 F 数(大于 10)微透镜阵列的方法. 这种方法是将一层具有较高粘滞系数的光刻胶,均匀地涂覆在经过传统光刻胶热熔法制作成形的微透镜阵列上,在光刻胶的粘滞作用以及烘烤过程中光刻胶自身表面张力的共同作用下,即可获得面形良好、 F 数得到提高的微透镜阵列结构.

1 制备方法

制备大 F 数微透镜阵列方法的具体过程如图 1. 首先采用传统光刻胶热熔法及反应离子刻蚀工艺获得 SiO_2 上的微透镜阵列结构,其具体过程如图 1(a)~(d)所示:旋涂获得一定厚度的光刻胶,在圆形阵列图案掩膜的遮蔽下进行紫外曝光,经过显影后在基底上形成对应的圆柱体阵列光刻胶结构,再进行烘烤,将光刻胶加热至熔融状态,熔融的光刻胶由于表面张力的作用,圆柱体转变为光滑的球冠状结构,这样就得到了由光刻胶构成的微透镜阵列. 最后,进行反应离子刻蚀,将光刻胶上的微透镜阵列结构传递到 SiO_2 上.

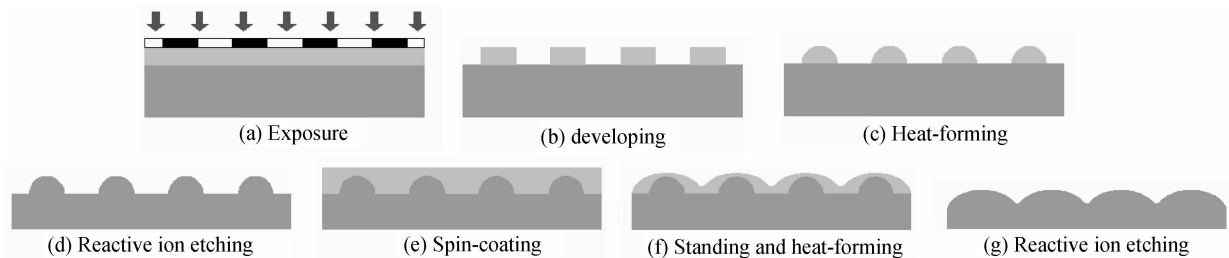


图 1 工艺流程

Fig. 1 Schematic of the fabrication process

在完成 SiO_2 微透镜阵列结构的制作后,将一层具有较高粘滞系数的光刻胶均匀地涂覆在 SiO_2 微透镜阵列上. 在自身重力的作用下,微透镜球冠上的光刻胶向间隙处流淌,光刻胶在球冠的间隙处聚集;并且,由于光刻胶具有较高的粘滞系数,仍然有一部分光刻胶粘附在微透镜球冠上. 如图 2 所示,其中 H_1 和 H_2 分别为原始微透镜和处理后的微透镜的矢高, d_1 和 d_2 分别为微透镜球冠处和间隙处的光刻胶厚度. 在重力和粘滞力的共同作用下,微透镜球冠上的光刻胶厚度远小于间隙处的光刻胶厚度,即 $d_1 < d_2$,由 $H_2 = H_1 - (d_2 -$

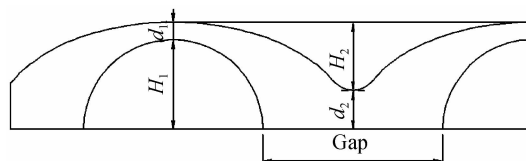


图 2 扩大 F 数原理示意图

Fig. 2 Principle diagram of the F -number expanding

d_1), 则 $H_2 < H_1$. 之后, 将基片放在热板上进行烘烤, 间隙处的光刻胶在表面张力的作用下形成光滑的凹陷曲面. 凹陷曲面结构与球冠结构相连接, 共同构成了光滑的、曲率减小即 F 数增大的微透镜阵列结构. 最后, 进行反应离子刻蚀, 将光刻胶上的结构传递到基底上, 获得大 F 数 SiO_2 微透镜阵列.

2 实验过程

首先采用传统光刻胶热熔法及反应离子刻蚀工艺获得 SiO_2 上的微透镜阵列结构. 基底采用熔融 SiO_2 材料, 将正性光刻胶 AZ9260 以 5 000 rpm 的转速旋涂 30 s 后, 放置在温度为 100°C 的水平热板上前烘 5 min, 待基片冷却到室温后进行紫外曝光. 使用 URE-2000S/A 型紫外光刻机, 在中心波长为 365 nm, 光功率密度为 $5 \text{ mW}/\text{cm}^2$ 的紫外光下曝光 30 s 后, 放入 AZ400K(1:1.5) 显影液中显影 30 s, 使用氮气吹干基片表面, 获得圆柱体阵列结构. AZ9260 光刻胶的玻璃态转化温度约为 120°C , 将基片水平放置在温度为 135°C 的热板上烘烤 15 min 后, 圆柱体转变为光滑的球冠状结构, 获得光刻胶微透镜阵列结构. 使用中科院微电子所生产的 ME-3A 型反应离子刻蚀机进行刻蚀; 调节刻蚀功率为 150 W (不加磁场), 同时调节射频匹配器使反射功率下降到最低, 使刻蚀均匀性达到最高; 调节反应气体流速比例为 $\text{CHF}_3 : \text{SF}_6 = 40 : 16$ (sccm), 此时刻蚀选择比为 1:1, 可以将光刻胶上的结构按 1:1 的比例转移到 SiO_2 基底上; 由于使用的刻蚀功率比较低即刻蚀速率较低, 且刻蚀比为 1:1, 刻蚀获得的二氧化硅微透镜阵列表面与光刻胶结构一致性很高, 表面光滑. 图 3 是使用表面轮廓仪测量的面形图, 单个微透镜的子口径 $D = 176.6 \mu\text{m}$, $H = 5.7 \mu\text{m}$. 由公式 $F\# = D/[8(n-1)h]$ (D 为微透镜直径, n 为介质折射率, h 为微透镜矢高), 则该微透镜阵列的 $F\# = 7.75$.

按质量比分别为 10:1、10:2、10:3、10:5、10:7 和 10:10 的比例调配一系列粘度不同的光刻胶, 本文使用的稀释剂为有机溶剂丙二醇甲醚醋酸酯 (PGMEA), 光刻胶采用浓度为 520 cps 的 AZ9260, 调配后的光刻胶使用粘度计测定粘度曲线如图 4 所示.

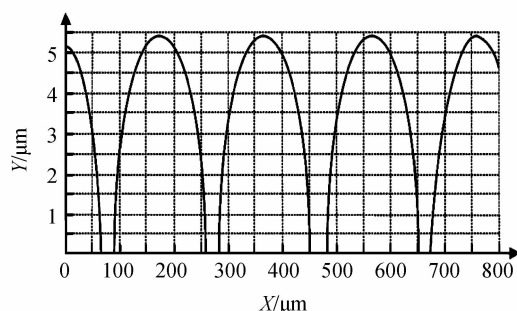


图 3 SiO_2 微透镜阵列面形图

Fig. 3 The surface profile of SiO_2 microlens

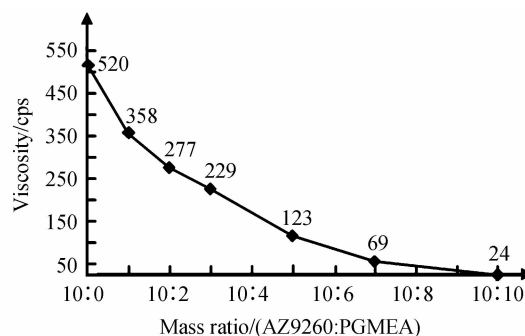


图 4 光刻胶粘度曲线

Fig. 4 The viscosity curve of photoresist

然后, 将调配好的光刻胶均匀地涂覆在 SiO_2 微透镜阵列上, 为使多余的光刻胶迅速脱离基片, 将基片放在匀胶机上低速 (500 rpm) 旋转. 球冠上的光刻胶在自身重力作用下, 微透镜球冠上的光刻胶向间隙处流淌, 光刻胶在球冠的间隙处聚集; 并且, 由于光刻胶具有较高的粘滞系数, 仍然有一部分光刻胶粘附在微透镜球冠上. 在重力和粘滞力的共同作用下, 微透镜球冠上的光刻胶厚度远小于间隙处的光刻胶厚度. 最后将基片放在热板上进行烘烤, 再采用反应离子刻蚀技术, 制备出 F 数较之前增大的微透镜阵列结构.

3 实验结果和讨论

使用粘度不同的光刻胶制备出一系列曲率不同的微透镜阵列结构, 并利用表面轮廓仪测得如图 5 所示的微透镜面形图, 并绘制出如图 6 所示的光刻胶粘度与微透镜 F 数的关系曲线. 可以明显看出, 随着光刻胶粘度的增大, 获得的单个微透镜矢高 H 逐渐减小, F 数逐渐增大. 建立图 4 与图 6 两组曲线, 即可获得“光刻胶稀释比例-光刻胶粘度-微透镜阵列 F 数”的对应关系. 这样, 如果要制备一定 F 数的微透镜阵列, 只要对应地调配一定比例的光刻胶, 然后采用本文的制作方法, 就可以制备出特定 F 数的微透镜阵列.

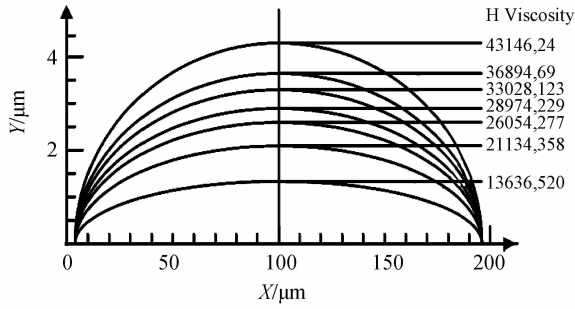


图 5 微透镜面形图

Fig. 5 The surface profile of microlens fabricated by different viscosity photoresist

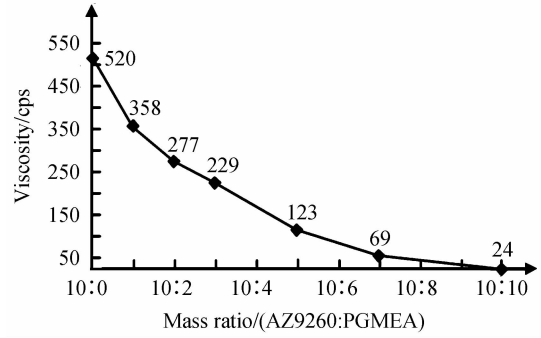


图 6 粘度与 F 数关系曲线

Fig. 6 The relationship curve of photoresist viscosity and F -number

完全使用 AZ9260(520 cps)覆盖基片获得的微透镜阵列矢高最小, $H=1.3636 \mu\text{m}$, $F\# = 40$. 使用白光干涉仪获得的测试结果如图 7, 可以看出单个微透镜的表面光滑、面形良好.

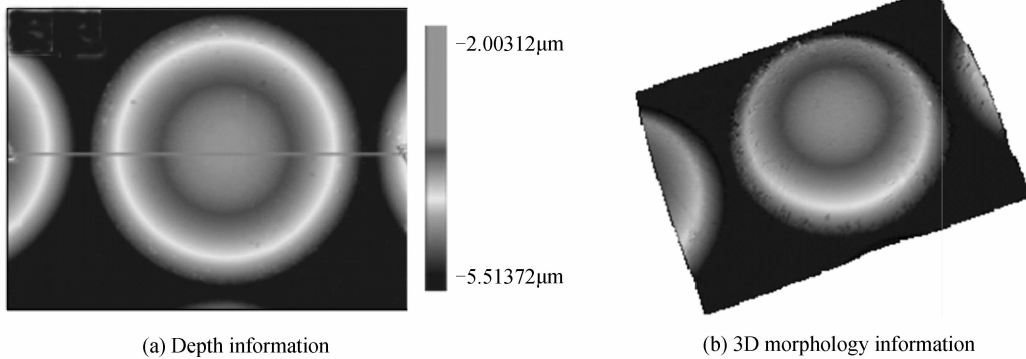


图 7 白光干涉仪测试结果

Fig. 7 The white-light interferometer pictures

图 8 是使用表面轮廓仪测量 F 数为 40 的微透镜面形图, 经计算, 实际面形与期望面形的偏差为 3.6%, 满足使用需求, 且从图中可以看出高度均匀性较好. 验证了该方法制备大 F 数微透镜阵列的可行性. 但是, 从图 8 中也可以看出, 获得的微透镜面形与期望面形相比, 从球冠顶端到底端的过度不够圆滑, 更趋向于线性过度. 这是因为球冠上的光刻胶在向间隙处流淌的过程中, 局部光刻胶上表面趋向于平面, 与期望得到的球形面形有所差异.

搭建实验光路, 使用制备的 F 数为 40 的微透镜阵列对字母“A”进行成像, 其成像结果如图 9. 可见, 成像清晰度较高, 且均匀性较好, 满足实用化需求.

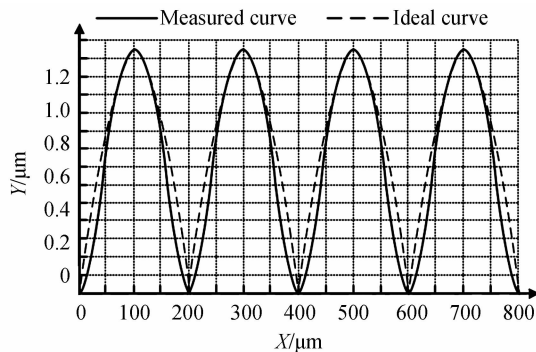


图 8 F 数为 40 的微透镜面形图

Fig. 8 The surface profile of the microlens with F -number 40

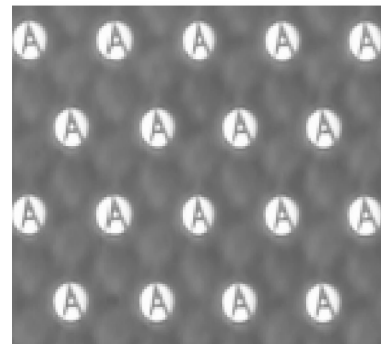


图 9 光学成像结果

Fig. 9 Optical imaging formation photography

4 结论

在分析大 F 数微透镜阵列结构特点的基础上,提出了一种制备大 F 数(大于 10)微透镜阵列的方法.该方法利用光刻胶的粘滞作用以及烘烤过程中光刻胶自身的表面张力,实现了大 F 数微透镜阵列的制备.与传统大 F 数微透镜阵列的加工方法相比,该方法简便易行、制备的微透镜阵列面形良好,且只需调节光刻胶的粘滞系数,即可获得矢高不同、 F 数不同的微透镜阵列.

参考文献

- [1] CHEN Kuan-yu, CHANG Yung-ting, HO Yu-hsuan, *et al.* Emitter apodization dependent angular luminance enhancement of microlens-array film attached organic light-emitting devices[J]. *Optics Express*, 2010, **18**(4): 3238-3243.
- [2] QIONG Hua-wang, HUAN Deng, TIAN Tian-ao, *et al.* Imitating micro-lens array for integral imaging[J]. *Chinese Optics Letters*, 2010, **8**(5): 512-514.
- [3] DENG Ze-fang, YANG Qing, CHEN Feng, *et al.* High-performance laser beam homogenizer based on double-sided concave microlens[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2014, **26**(20): 2086-2089.
- [4] BUENO J, ACOSTA E, SCHWARZ C, *et al.* Wavefront measurement of phase combining a point-diffraction interferometer and a Hartmann-Shack sensor[J]. *Applied Optics*, 2010, **49**(3): 450-456.
- [5] HE Feng-tao. Study of the technologies of high-density optical data storage with short-wavelength laser source and solid immersion lens[D]. Xi'an: Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, 2004.
贺锋涛. 短波长与固体浸没透镜高密度光存储技术研究[D]. 西安: 中国科学院西安光学精密机械研究所, 2004.
- [6] LEGGATT J S, HUTLEY M C. Microlens arrays for interconnection of individual mode fiber arrays[J]. *Electronics Letters*, 1991, **27**: 238-240.
- [7] AMATO D. The international society for optical engineering[C]. Bergen: Ocean optics, 1991: 166-177.
- [8] WU Wen-ting, LIANG Zhong-cheng, ZHANG Le. Optofluidic varifocal microlens [J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2015, **36**(6): 718-723.
吴雯婷,梁忠诚,张乐. 可调微流控光学变焦透镜[J]. 发光学报, 2015, **36**(6): 718-723.
- [9] LIAO Jun, WANG Hai-dong, DING Jian-ping, *et al.* Multiple image produced by micro-lens array[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2001, **28**(1): 52-54.
廖军,王海东,丁剑平,等. 利用微透镜阵列产生多重像[J]. 中国激光, 2001, **28**(1): 52-54.
- [10] LIN Che-ping, YANG Hai-harng, CHAO Ching-kong. Hexagonal microlens array modeling and fabrication using a thermal reflow process[J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2003, **13**(5): 775-781.
- [11] LI Feng, CHEN Si-hai, LAI Jian-jun, *et al.* Design and fabrication of polymer microlens array with self-written waveguide[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2011, **38**(3): 202-207.
李凤,陈四海,赖建军,等. 自写入光波导聚合物微透镜阵列的设计与制作[J]. 中国激光, 2011, **38**(3): 202-207.
- [12] ZHANG Xin-yu, TANG Qing-le, ZHANG Zhi, *et al.* Ion beam etching fabrication of concave refraction microlens array [J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(4): 485-490.
张新宇,裴先登,汤庆乐,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.
- [13] BORRELLI N F. Photolytic technique for producing microlens in photosensitive glass[J]. *Applied Optics*, 1985, **24**(16): 2520-2525.
- [14] OIKAWA M, IGA K. Array of distributed index planar microlens and its application[J]. *Applied Optics*, 1982, **21**(9): 1052-1056.
- [15] OIKAWA M. Array of distributed-index planar micro-lenses prepared from ion-exchange technique[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 1981, **20**(4): 296-298.
- [16] HAN Yan-ling, LIU De-sen, JIANG Xiao-ping. Square self-focusing lens array and its image[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(2): 221-223.
韩艳玲,刘德森,蒋小平. 方形自聚焦透镜元阵列及其成像[J]. 光子学报, 2007, **36**(2): 221-223.
- [17] LU Yi, CHEN Shao-chen. Direct write of microlens array using digital projection photopolymerization[J]. *Applied Physics Letters*, 2008, **92**(4): 1-3.
- [18] CHANG Chi-yuan, YANG Sen-yeu, HUANG Long-sun, *et al.* Fabrication of plastic microlens array using gas-assisted micro-hot-embossing with a silicon mold[J]. *Infrared Physics and Technology*, 2006, **48**: 163-173.
- [19] MACFARLANE D L, NARAYAN V, TATUM J A, *et al.* Microjet fabrication of microlens arrays[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1994, **6**: 1112-1115.
- [20] CHEN Ming-jun, LIU Ye-sheng, LI Zi-ang, *et al.* New research progress in design and manufacture of artificial optical compound eye[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2011, **47**(1): 151-168.
- [21] XU Qiao, YE Jun, ZHOU Guang-ya. Fabrication of refractive microlens array by melting photoresist[J]. *Acta Optica*

- Sinica*, 1996, **16**(9): 1326-1331.
- 许乔, 叶钧, 周光亚, 等. 折射型微透镜列阵的光刻热熔法研究[J]. 光学学报, 1996, **16**(9): 1326-1331.
- [22] POPOVIC Z D, SPRAGUE R A, NEVILLE G A. Technique for monolithic fabrication of microlens arrays[J]. *Applied Optics*, 1988, **27**(7): 1281-1284.
- [23] XU Qiao, YANG Li-ming, SHU Xiao-wu, *et al.* Step heat-forming photoresist method for expanding the NA range of refractive microlens[J]. *Acta Optica Sinica*, 1998, **18**(8): 1128-1133.
- 许乔, 杨李茗, 舒晓武, 等. 扩展微透镜数值孔径范围的阶梯光刻热熔法研究[J]. 光学学报, 1998, **18**(8): 1128-1133.
- [24] REN Zhi-bin, LU Zhen-wu. Improving the fill factor and F number of refractive microlens array by reducing developing time[J]. *Journal of Optoelectronics Laser*, 2005, **16**(2): 150-154.
- 任智斌, 卢振武. 通过缩短显影时间提高微透镜阵列的填充因子与 F 数[J]. 光电子·激光, 2005, **16**(2): 150-154.
- [25] BIAN Rui, XIONG Ying, CHEN Xian-yu, *et al.* Ultralong focal length microlens array fabricated based on SU-8 photoresist[J]. *Applied Optics*, 2015, **54**(16): 5088-5093.
- [26] WEI Hsiang-chun, SU Guo-dung. Self-assembled microlens on top of light-emitting diodes using hydrophilic effect for improving extraction efficiency and increasing viewing angle[J]. *Journal of Display Technology*, 2012, **8**(8): 444-449.