

NOA73 材料的微透镜阵列快速制造技术

崔建利 张斌珍 段俊萍 赵 龙 南雪莉 刘 源

中北大学电子测试技术重点实验室, 山西 太原 030051

摘要 针对传统微透镜阵列制作工艺复杂、成本高、周期长等缺点,研究了一种低成本、高效率制作微透镜阵列的技术方法。以 SU-8 负性光刻胶为主模结构材料,采用 2 次紫外斜曝光工艺,加工出主光轴平行于硅基的微透镜阵列作为主模结构。依次采用聚二甲基硅氧烷(PDMS)软光刻技术和 NOA73 紫外曝光技术对主模结构进行复制得到 PDMS 和 NOA73 2 种材料的微透镜阵列,用共聚焦显微镜观察微透镜阵列的表面形貌并搭建光学检测平台,测试微透镜阵列的成像效果。结果显示,NOA73 材料的微透镜阵列具有更好的光学性能。通过上述工艺加工的微透镜阵列具有较好的成像效果和表面形貌,重复性好且加工周期短,可集成在微流式细胞仪中用于样本流的荧光检测,提高了检测精度。

关键词 光学器件;微透镜阵列;NOA73;斜曝光;聚二甲基硅氧烷;软光刻

中图分类号 TN23

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201643.0703003

Rapid Fabrication Technology of Microlens Arrays Based on NOA73

Cui Jianli Zhang Binzhen Duan Junping Zhao Long Nan Xueli Liu Yuan

*Science and Technology on Electronic Test & Measurement Laboratory, North University of China,
Taiyuan, Shanxi 030051, China*

Abstract In order to solve shortcomings such as technology complexity, high cost and long cycle in the traditional microlens array, a new method to fabricate microlens array with low cost, high efficiency has been studied. The microlens array main mold structure is made with the main optical axis parallel to the silicon base, which uses SU-8 negative photoresist mold structure material as the material of main mold structure and two tilt-exposure technology. Polydimethylsiloxane (PDMS) soft lithography and NOA73 UV-exposure technology are taken to copy the main mold structure, and NOA73 microlens array and PDMS microlens array are made successively. The surface topography of the microlens array is observed by confocal microscope and an optical detection platform is built to test the imaging effect of the microlens array. The result shows that NOA73 microlens array has better optical characteristics. The microlens array has better imaging effect and surface topography with above technology process. It has advantages such as good repeatability, short processing cycle, and can be integrated in the micro-flow cytometry instrument to process fluorescence detection of the sample flow, which can enhance the detection precision.

Key words optical devices; microlens array; NOA73; tilt-exposure; polydimethylsiloxane; soft lithography

OCIS codes 230.4040; 220.4241; 140.3580

1 引 言

近年来,随着微机电系统(MEMS)研究领域的迅速发展,其诸多优点逐渐被各大单位和高校所青睐。

收稿日期: 2015-12-07; **收到修改稿日期:** 2016-03-11

基金项目: 国家自然科学基金项目(61401405,51475438)、山西省基础研究项目(2014011021-4)、新世纪优秀人才支持计划资助项目(130951862)

作者简介: 崔建利(1990—),女,博士研究生,主要从事 MEMS 射频微波器件和工艺开发方面的研究。

E-mail:18334789099@163.com

导师简介: 张斌珍(1974—),男,博士,教授,主要从事微纳器件和系统的设计制造、微弱信号检测与处理以及恶劣环境下存储测试理论与技术方面的研究。E-mail:zhangbinzhen@nuc.edu.cn(通信联系人)

随之衍生出 1 个重要的分支研究领域-微光机电系统(MOEMS),它给传统光学器件的设计与制造提供了一种全新的方法^[1-3],具有尺寸微小、成本低廉、加工简单、性能优越且易于批量生产等优点。

透镜作为任何自由空间微纳米尺度光学系统的重要器件^[4-5],寻求一种高效率、易加工、低成本的加工技术和工艺显得越来越重要。目前最常用的基于光刻技术的聚合物材料微透镜^[6-9]阵列加工方法主要采用的是热熔法^[10],即利用紫外光刻工艺在硅基上加工出圆柱体阵列,再通过升温使光刻胶达到软溶状态,利用液体表面张力形成微透镜阵列^[11]。采用该方法加工出的微透镜阵列主光轴是垂直于基底的,且不易剥离,由此产生了光学平台不易搭建、与传统光学器件不易集成、实用性不好等问题。相关报道中还提到了诸如灰度光刻法、玻璃刻蚀法等微透镜加工方法,但这些方法制造的微透镜阵列主光轴都是垂直于基片平面的,由此形成的微型光学系统不利于光学平台的组装以及与其他光学器件的集成。King C R 等^[12-14]提出了在微透镜上安装机械铰链,利用电磁力扭转 90°,达到微透镜主光轴平行于基底的目的,但该方法增加了系统的复杂度、不易于操作、不易于与其他系统集成。

本文选用一种新型的光学材料-NOA73^[15]制作微透镜阵列。NOA73 是一种紫外固化光学胶,光学透明,透射率几乎达到 100%,与 SU-8、聚二甲基硅氧烷(PDMS)^[16]相比,其加工工艺简单,具有更好的成像效果和表面形貌。采用本文方法制作的微透镜阵列直径在百微米级别,有着广泛的应用前景。

2 微透镜阵列的制作

2.1 斜曝光原理

该微透镜阵列的制作首先需要采用 SU-8 负性光刻胶并利用 2 次斜曝光技术制作阵列主模。如图 1 所示为斜曝光原理图,通过改变紫外光与基片的夹角可以制作不同曲率的透镜阵列,这里选用 45°来制作微透镜阵列。考虑光在不同介质中的折射率不同,为了得到与基片成 45°角的光束(即 $\theta_1 = 45^\circ$),需要确定加上掩膜版后其与紫外光所成的角度(即 θ_3)。根据折射原理可知: $n_{\text{SU-8}} \sin \theta_1 = n_{\text{glass}} \sin \theta_2 = n_{\text{water}} \sin \theta_3$,将 $\theta_1 = 45^\circ$ 代入上述公式中,计算可得 $\theta_3 \approx 60^\circ$ 。

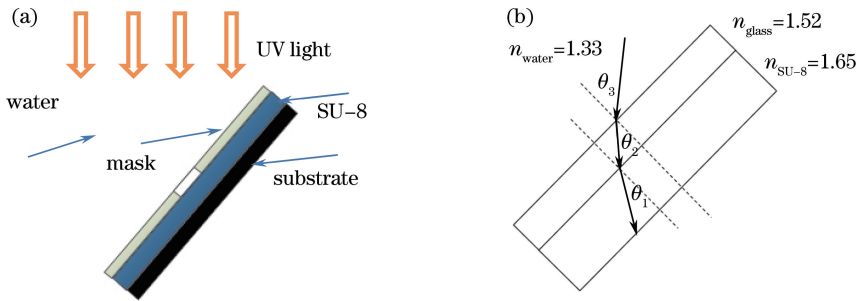


图 1 斜曝光原理图。(a) 斜曝光示意图; (b) 斜曝光折射原理图

Fig. 1 Schematic diagram of title-exposure. (a) Schematic plot of title-exposure; (b) refraction schematic plot of title-exposure

设计一种特殊的玻璃缸,玻璃缸底部设计有卡块,可以使掩膜版倾斜 60°,故根据掩膜版的尺寸可以计算出卡块距离玻璃缸侧壁距离 $a = \frac{12.7 \text{ cm}}{2} = 6.35 \text{ cm}$ 。将掩膜版和匀好光刻胶的基片固定在一起,在 2 个对称方向上倾斜放置在玻璃缸中进行 2 次紫外光刻。如图 2 所示。对球面透镜来说,需要在光刻中使用 2 束圆柱光束,当 2 束光柱按照设计要求相互垂直照射在基片上后,就会形成 2 个圆柱面相交的交叠区域。为了在倾斜 45°后得到圆柱光束,需要将掩膜版上的透光区域设计成椭圆,且长轴与短轴之比为 $\sqrt{2} : 1$ 。图 3 所示为 SU-8 微透镜阵列制作过程,2 束相交 90°的圆柱光柱对光刻胶进行曝光[如图 3(a)所示]后,双曝光区域实际是由 4 个带有尖锐边缘的局部圆柱面形成的结构[如图 3(b)所示]。但是在显影过程中,显影液对尖锐部分的腐蚀速率要比平滑部分快很多,这样双曝光区域的尖锐部分就会被腐蚀掉,形成表面圆滑的微透镜结构[如图 3(c)所示]。

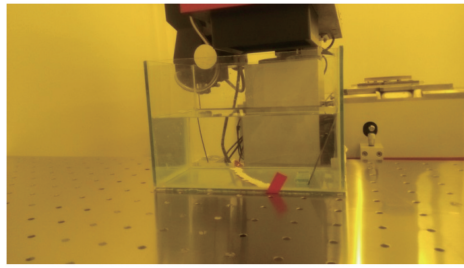


图 2 斜曝光装置

Fig. 2 Tilt-exposure appliance

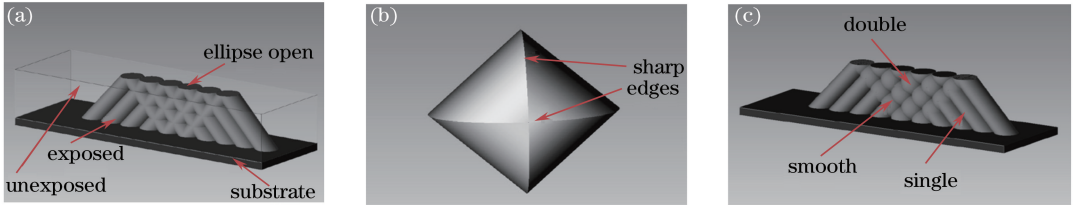


图 3 U-8 微透镜阵列的制作流程图。(a) 两次斜曝光形成的图形；

(b) 未腐蚀尖锐边缘部分的单个透镜；(c) 尖锐边缘被腐蚀后的透镜阵列

Fig. 3 Process flow diagram of SU-8 microlens array. (a) Figure formed by two tilt-exposures;

(b) single lens of sharp edge without corrosion; (c) microlens array of sharp edge with corrosion

2.2 微透镜阵列的制作

微透镜阵列加工工艺主要分为 3 个步骤:1) 利用 2 次 45°交叉斜曝光工艺,加工制作 SU-8 结构微透镜阵列作为主模;2) 用 PDMS 预聚物和固化剂以 10 : 1 的比例配制 PDMS,然后进行 PDMS 倒模,制作出微透镜阵列的 PDMS 负模;3) 在 PDMS 负模里填充 NOA73,经过紫外固化得到 NOA73 材料的微透镜阵列;对 PDMS 负模进行表面处理,填充进 PDMS,进行 PDMS 倒模,热固化得到 PDMS 材料的微透镜阵列。

工艺流程如下所示:1) 选用 SU-82100 在硅基上均匀涂覆 1000 μm 。根据 MICROCHEM 公司 SU-82100 产品说明书可知,400 r/min 的转速可得到 1000 μm 厚的光刻胶;2) 将前烘完成的 SU-82100 覆以预先设计好的掩膜版进行正反 2 个方向的 45°倾斜光刻,由 MICROCHEM 公司提供的数据以及大量实验数据显示,2 次斜曝光均采用 2800 mJ 的光刻剂量(每次 400 mJ,7 次,间隔 10 s);3) 将后烘好的片子完全浸入 SU-8 显影液中并在常温下进行超声处理,鉴于光刻胶比较厚,预计需要 20 min,待透镜阵列尖锐部分被腐蚀掉即制得 SU-8 材料的微透镜阵列主模结构;4) 由于 PDMS 材料具有优越的柔韧性和良好的流动性,在微透镜阵列制作过程中保证了制作精度和透镜的表面粗糙度。采用 PDMS 进行第 1 次翻模处理,将预先按照 PDMS 预聚物 : 固化剂以 10 : 1(质量比)配比好的 PDMS 均匀浇注于带有 SU-8 微透镜阵列主模结构的片子上并静置 1 h 后于 75 $^{\circ}\text{C}$ 加热 2 h 固化,将 PDMS 膜轻轻撕下来即可得到微透镜阵列的 PDMS 负模;5) PDMS 材料微透镜阵列的制作,将 4) 中所得 PDMS 负模结构浸入 HPMC 溶液中浸泡 1 h 后取出,将配比好的 PDMS 浇注于负模中,用玻璃片刮掉多余的 PDMS,上面覆以玻璃片,加热固化后得到 PDMS 材料的微透镜阵列;6) NOA73 材料微透镜阵列制作,将 NOA73 浇注于 4) 中的 PDMS 负模中,上面覆以玻璃片,进行 5000 mJ(每次 500 mJ,10 次,间隔 10 s)的紫外曝光得到 NOA73 材料的微透镜阵列。图 4 所示为 NOA73

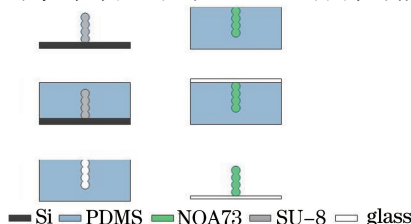


图 4 NOA73 微透镜阵列的制作流程图

Fig. 4 Process flow diagram of NOA73 microlens array

微透镜阵列制作工艺流程图。

3 结果与分析

3.1 表面形貌观测

将 SU-8 结构表面进行金属溅射,分别使用扫描电子显微镜(SEM)和共聚焦激光显微镜对其表面进行观测。利用共聚焦激光显微镜获取微透镜阵列的三维形貌,如图 5(a)所示。测量同 1 个透镜阵列在 1 个径向上各透镜的曲率,测得各透镜曲率半径大约为 $160 \mu\text{m}$,说明同 1 个透镜阵列中每个透镜都是均匀的。图 5(b)所示, SU-8 微透镜表面的粗糙度为 $1.2 \mu\text{m}$ 。如图 6 所示为实验又测量了单个透镜横向和纵向的曲率半径,测得横向和纵向 2 个径向的曲率半径分别为 $143 \mu\text{m}$ 和 $148 \mu\text{m}$,曲率约为 $0.007 \mu\text{m}^{-1}$,两者基本一致,说明同 1 个透镜各个部分的曲率半径相差不大,近似球面透镜。如图 7 所示为加工出的 SU-8 微透镜阵列 SEM 图,从图中可以看出,该微透镜阵列中透镜基本是均匀分布的,结构比较完整且表面相对光滑,说明该微透镜加工工艺具有较好的可行性。

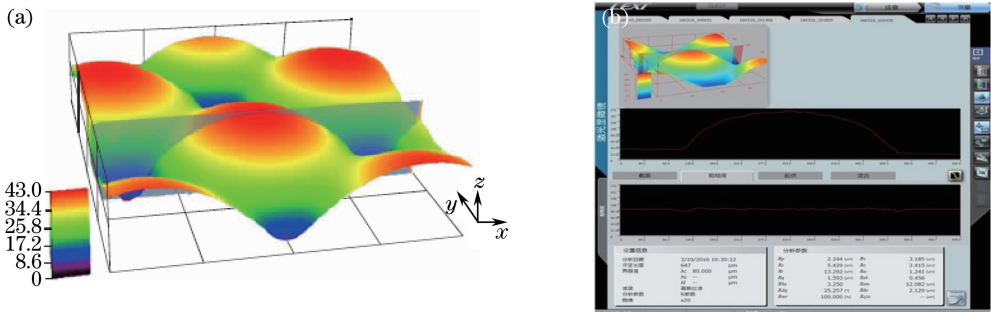


图 5 微透镜阵列的(a)三维形貌图和(b)粗糙度测试图

Fig. 5 (a) Three-dimensional topography and (b) roughness test chart of microlens array

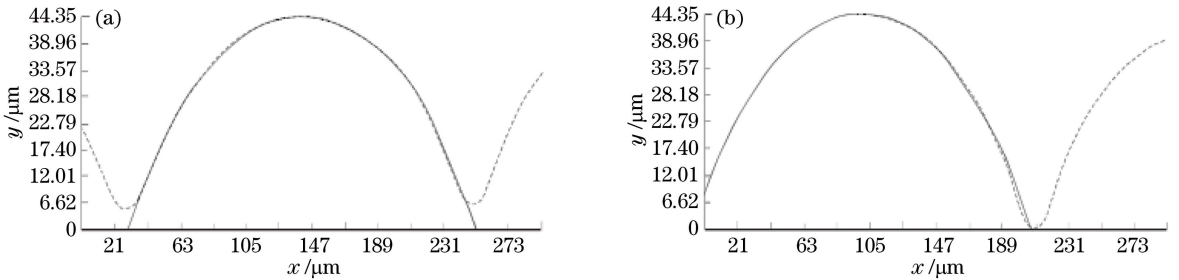


图 6 微透镜阵列的曲率测量。(a) 横向剖面图; (b) 纵向剖面图

Fig. 6 Curvature measuring of microlens array. (a) Horizontal profile map; (b) vertical profile map

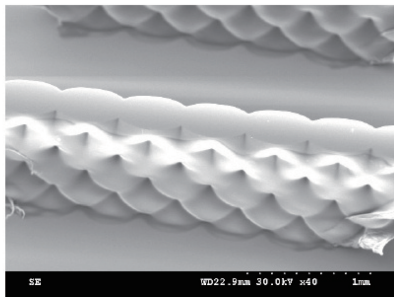


图 7 SU-8 微透镜阵列 SEM 图

Fig. 7 SEM diagram of SU-8 microlens array

3.2 光学传输效果测试

为了选取比较合适的材料制作微透镜阵列,利用光谱仪对制作微透镜阵列的 PDMS 和 NOA73 2 种材料传输光谱线进行测试并用 Matlab 软件进行分析,分析结果如图 8 所示。实验结果表明,NOA73 材料在波长大于 400 nm 的可见光和红外光范围内,透射率几乎达到 100%,比 PDMS 材料有着更好的透射率。

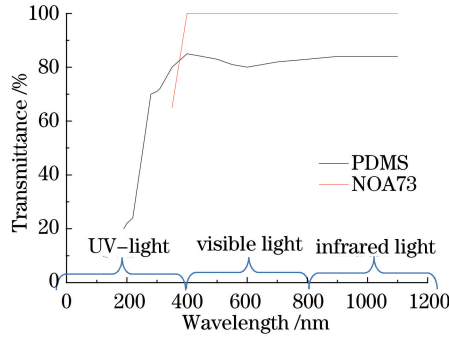


图 8 NOA73 和 PDMS 透射率特性曲线

Fig. 8 Transmission characteristic curves of NOA73 and PDMS

3.3 成像效果测试

通过 PDMS 软光刻技术和 NOA73 紫外曝光技术制作了 PDMS 微透镜阵列和 NOA73 微透镜阵列,如图 9 所示,通过搭建 CCD 光学平台^[18-19]分别对 2 种材料的微透镜阵列成像效果进行观察。实验采用对印有“F”字样的图像进行透镜成像测试,图 10 所示为 2 种材料的成像测试图,图 10(a)为 NOA73 微透镜阵列的成像测试效果,图 10(b)为 PDMS 微透镜阵列的成像测试效果图,从测试结果可以看到,NOA73 材料的微透镜阵列所聚焦的“F”字有着更好的清晰度和分辨率,且如图 8 所示,NOA73 材料在波长大于 400 nm 的可见光和红外光范围内,透射率几乎达到 100%。结果表明,NOA73 材料的微透镜阵列有着更好的光学性能。

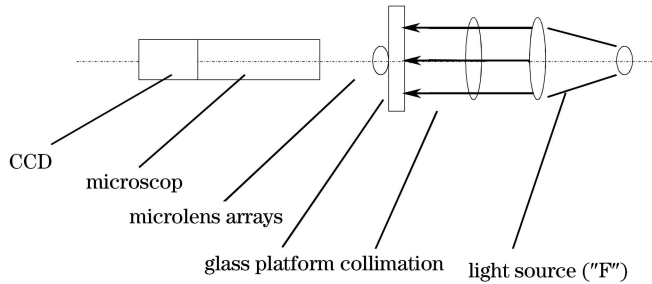


图 9 测量装置示意图

Fig. 9 Schematic diagram of measuring system

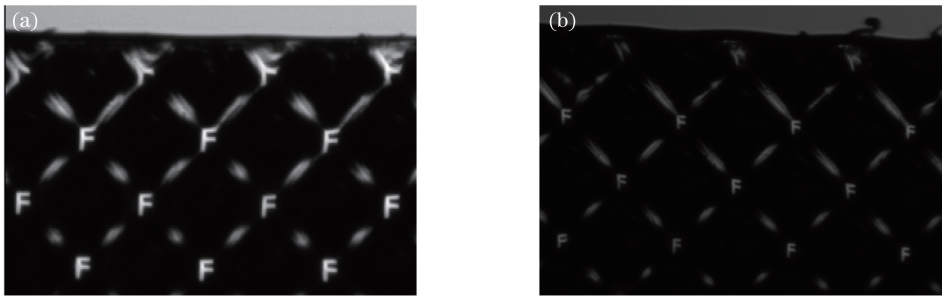


图 10 NOA73 和 PDMS 微透镜阵列的成像测试图。(a) NOA73; (b) PDMS

Fig. 10 Imaging test results of NOA73 and PDMS microlens array. (a) NOA73; (b) PDMS

4 结 论

利用斜曝光工艺和 NOA73 紫外固化技术,成功制作了 NOA73 微透镜阵列,并进行了光学检测和成像

测试。通过比较 PDMS 微透镜阵列和 NOA73 微透镜阵列的成像效果,表明 NOA73 材料的微透镜阵列具有更好的光学性能。本方法所制作的微透镜阵列具有主光轴平行于基底、光学性能优异的特点,且加工工艺简单、周期短、成本低,对于微光学元件的研究有一定的参考意义。

参 考 文 献

- 1 Lee S, Jeong Y C, Park J K. Facile fabrication of close-packed microlens arrays using photoinduced surface relief structures as templates[J]. *Optics Express*, 2007, 15(22): 14550-14559.
- 2 Wu M C, O Solgaard, Ford J E. Optical MEMS for lightwave communication[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2006, 24(12): 4433-4454.
- 3 Yang Luxia, Mao Jing, Wang Chunshui, *et al.*. Design and fabrication of microlens array with primary optical axis parallel to the substrate[J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2014, 25(5): 864-869.
杨璐霞, 毛 静, 王春水, 等. 主光轴平行于基底的微透镜阵列设计与制作[J]. *光电子 • 激光*, 2014, 25(5): 864-869.
- 4 Liu Jianlin, Zhang Binzhen, Cui Min, *et al.*. Design and fabrication of the micro lens arrays based on SU-8 [J]. *Micronanoelectronic Technology*, 2012, 49(3): 187-191.
刘建林, 张斌珍, 崔 敏, 等. 基于 SU-8 的微透镜阵列的设计和制作[J]. *微纳电子技术*, 2012, 49(3): 187-191.
- 5 Liu Yongming. Optomechanical analysis and optimization of precision lens[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2014.
刘永明. 光学精密透镜的光力耦合分析与优化设计[D]. 北京: 中国科学院大学, 2014.
- 6 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.
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.
- 7 Li Tonghai. The research to polymer microlens and arrays[D]. The Graduate School of the Chinese Academy of Sciences (Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics of Chinese Academy of Sciences), 2006.
李同海. 聚合物微透镜及其阵列的研究[D]. 中国科学院研究生院(西安光学精密机械研究所), 2006.
- 8 Zhong Kejun, Gao Yiqing, Li Feng, *et al.*. A method of fabricating concave polydimethylsiloxane microlens array[J]. *Chinese J Lasers*[J]. 2014, 41(3): 0310002.
钟可君, 高益庆, 李 风, 等. 一种制作凹形聚二甲基硅氧烷微透镜阵列的方法[J]. *中国激光*, 2014, 41(3): 0310002.
- 9 Hong Shuijin, Chang Honglong, Xun Wenpeng, *et al.*. A fabrication method for micro-lenses based on the PDMS membrane[J]. *Micronanoelectronic Technology*, 2014, 51(4): 257-261.
洪水金, 常洪龙, 寻文鹏, 等. 基于 PDMS 薄膜的微透镜制作方法[J]. *微纳电子技术*, 2014, 51(4): 257-261.
- 10 Zhang Yong, Zhang Binzhen, Wu Shujuan, *et al.*. Fabrication and measurement of microlens arrays with primary optical axis paralleled to wafers[J]. *Micronanoelectronic Technology*, 2013, 50(1): 47-51.
张 勇, 张斌珍, 吴淑娟, 等. 主光轴平行于基底的微透镜阵列制作与测试[J]. *微纳电子技术*, 2013, 50(1): 47-51.
- 11 Chung C K, Hong Y Z. Fabrication and analysis of the reflowed microlens arrays using JSR THB-130N photoresist with different heat treatments[J]. *Microsystem Technnologies*, 2007, 13(5): 523-530.
- 12 King C R, Lin L Y, Wu M C. Out-of-plane refractive microlens fabricated by surface micromachining [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1996, 8(10): 1349-1351.
- 13 Wu M C. Micromachining for optical and optoelectronic systems[J]. *Proceedings of the IEEE*, 1997, 85(11): 1833-1856.
- 14 Wu M C, Lin L Y, Lee S S, *et al.*. Free-space integrated optics realized by surface-micromachining[J]. *International Journal of High Speed Electronics and Systems*, 1997, 8(2): 51-65.
- 15 Zhao Wuxiang, Wang Qionghua, Li Lei. Tunable cylindrical liquid lens array for 2D/3D switchable display [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(8): 0823001.
赵悟翔, 王琼华, 李 磊. 用于 2D/3D 可切换显示的柱状液体透镜阵列[J]. *光学学报*, 2015, 35(8): 0823001.
- 16 Li Xianghong, Liu Jun, Zhang Binzhen, *et al.*. Fabrication of NOA73 curved microlens arrays [J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2013, 24(2): 292-296.
李向红, 刘 俊, 张斌珍, 等. NOA73 材料的曲面微透镜阵列的制作[J]. *光电子 • 激光*, 2013, 24(2): 292-296.
- 17 Li Feng, Gao Yiqing, Xu Guangtao, *et al.*. Effectiveness analysis of transfer by using of PDMS for fabricating MLA with soft lithograph technique[J]. *Journal of Nanchang Hangkong University (Natural Sciences)*, 2014, 28(3): 71-77.
李 风, 高益庆, 许广涛, 等. PDMS 在使用软光刻技术制作微透镜阵列的转印效果分析[J]. *南昌航空大学学报(自然科学版)*, 2014, 28(3): 71-77.

- 18 Zhang Xu, Li Chen. Calibration and imaging model of light field camera with microlens array[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(12): 1211005.
张 旭, 李 晨. 微透镜阵列式光场成像模型及其标定方法[J]. 光学学报, 2014, 34(12): 1211005.
- 19 Shao Ping, Xia Lan, Zhao Dongfeng, *et al.*. Measurement and debugging of wedge-shaped lens in high power laser facility[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(4): 0408006.
邵 平, 夏 兰, 赵东峰, 等. 高功率激光装置终端楔形透镜的测量与调试[J]. 中国激光, 2015, 42(4): 0408006.