

自写入光波导聚合物微透镜阵列的设计与制作

李 凤^{1,3} 陈四海² 赖建军² 周一帆² 高益庆^{1,3}

¹ 南京航空航天大学自动化学院, 江苏 南京 210016
² 华中科技大学光电子科学与工程学院武汉光电国家实验室, 湖北 武汉 430074
³ 南昌航空大学测试与光电工程学院, 江西 南昌 330063

摘要 利用聚合物 SU-8 光刻胶在激光作用下折射率会发生变化的特点, 将其作为最后的光学材料, 采用光刻胶热熔法和图形转移法, 设计并制作了填充因子接近 0.75、自写入光波导、六角排列的微透镜阵列。对阵列的表面形态、三维结构和光学性能分别进行了观察、测试与分析, 发现用 SU-8 胶制作的微透镜阵列外观良好, 边缘清晰; 自写入光波导微透镜阵列的三维结构良好; 波导末梢的光点分布均匀, 光强一致性高。这种自写入光波导的微透镜阵列降低了透镜阵列与探测阵列精确装配的难度, 而且其制作工艺简单、成本低廉、适合批量复制, 这种阵列元件还有质量轻、体积小等特点, 有很广的应用前景。

关键词 光学器件; 微光学元件; 聚合物微透镜阵列; 光刻胶热熔法; SU-8 胶; 自写入

中图分类号 O439 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/CJL201138.0310003

Design and Fabrication of Polymer Microlens Array with Self-Written Waveguide

Li Feng^{1,3} Chen Sihai² Lai Jianjun² Zhou Yifan² Gao Yiqing^{1,3}

¹ College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, Jiangsu 210016, China

² Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, College of Optoelectronic Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China

³ School of Measuring and Optical Engineering, Nanchang Hangkong University, Nanchang, Jiangxi 330063, China

Abstract Polymer microlens array with self-written waveguides is fabricated with SU-8 material which is a kind of epoxy based photoresist. Melting photoresist and image transferring are employed to fabricate the microlens array. Because of the melting and attendant expanding process of the photoresist, the actual fill factor of the array exceeds the design one, which is 0.749. SU-8 photoresist and glass substrate are separated by a layer of polydimethylsiloxane (PDMS) due to the strong bonding force between them. With the good separation effect of PDMS film, UV-cured SU-8 microlens array is obtained without mechanical damage. Profile, performance of the light spots at the end of the self-written waveguides and their uniformity are observed and tested. It is concluded that the SU-8 microlens array with self-written waveguides is fine, it images the filament of the metallographic microscope well and its light spots at the end of the waveguide are of high uniformity. By using this polymer microlens array, the assembling between the microlens array and detector array is expected to be achieved easily. This polymer microlens array has great potential applications in many optoelectronic devices.

Key words optical devices; micro-optical element; polymer microlens array; melting photoresist; SU-8 photoresist; self-written

OCIS codes 160.4670; 230.3990; 130.3990

收稿日期: 2010-09-07; **收到修改稿日期:** 2010-11-22

基金项目: 国家自然科学基金(61072131)、新世纪优秀人才计划(NCET-07-0319)和南昌航空大学科研基金(EC200908228)资助课题。

作者简介: 李 凤(1981—),女,博士研究生,主要从事微纳光电器件方面的研究。E-mail: lf_swnu@yahoo.com.cn

导师简介: 高益庆(1951—),男,教授,主要从事微纳光电器件、光电信息处理及二元光学等方面的研究。

E-mail: gyqniat3@msn.com

1 引 言

微透镜阵列作为微光学的基本元件,在光通信、CCD和CMOS图像传感、三维立体成像等领域都得到了广泛应用,主要作用是将入射光信号聚焦在探测阵列、光纤或传感器上,例如与有机发光二极管(OLED)耦合提高其出光效率^[1,2],与红外焦平面阵列单片集成提高其填充因子^[3,4],产生激光点阵用以并行扫描^[5]、集成成像或产生多重像^[6,7]等。为了获得最佳的光信号,探测阵列必须精确位于透镜阵列的焦平面上,存在装配难度高的问题。

聚合物光学材料的迅速发展为制作微光学元件提供了许多新的思路和方法^[8~11]。有一部分聚合物光刻胶在紫外激光的作用下,折射率会发生不可逆的变化,即自聚焦现象,使得其中留下具有明显能束光的波导结构。SU-8胶(Microchem公司)就是这样一种负性环氧树脂型光刻胶,它对波长在350~400 nm之间的光高度吸收,发生强烈反应后固化,表现出良好的化学稳定性、机械稳定性和热稳定性,适合用来制作高深宽比的三维微结构^[12],已经在机电系统和微光学元件的制作中得到了广泛的应用。本文用SU-8胶作为最后的光学材料,设计了填充因子接近0.75的微透镜阵列,使用光刻胶热熔法和图形转移法,避免了离子束刻蚀的复杂操作与

控制过程,制作出了具有质量轻、体积小、自写入光波导等特点的微透镜阵列,并对其光学性能进行了测试与分析。这种带有自写入波导结构的微透镜阵列能大大降低与探测阵列的精确耦合难度,只要将探测阵列放在波导末梢所在的二维平面上即可,省去了很多对准工作。

2 聚合物微透镜阵列的掩模设计

填充因子是指单位面积内有效微透镜面积的比例,是衡量微透镜阵列性能参数的一个重要指标。填充因子越高,光信息、光能量的利用率也越高。图1是圆形微透镜阵列掩模的两种设计方案。任意两个紧邻的微透镜的圆心之间的距离为 D ,边缘之间的最小距离为 d 。六角排列的阵列中,任意三个两两紧邻的微透镜的圆心是边长为 D 的正三角形的三个顶点。四方排列的阵列中,任意四个构成最小四方排列的微透镜的圆心是边长为 D 的正方形的四个顶点。根据阵列的周期性,可以推算出六角排列的填充因子 $\eta_a = \pi \left(\frac{D-d}{2} \right)^2 / \left(D^2 \sin \frac{\pi}{3} \right)$,四方排列的填充因子 $\eta_b = \pi \left(\frac{D-d}{2} \right)^2 / D^2$,且 $\eta_a > \eta_b$,前者是后者的1.15倍,所以,在实验中选择六角排列阵列。

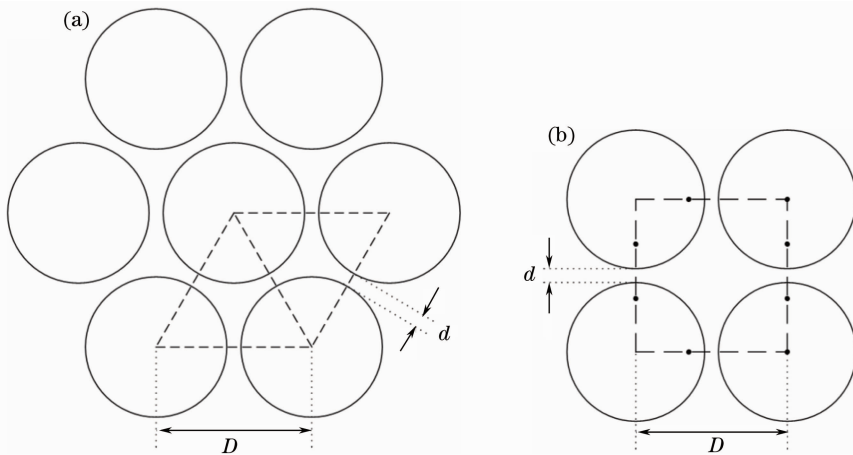


图1 (a)圆形微透镜阵列六角排列的掩模,(b)圆形微透镜阵列四方排列的掩模

Fig. 1 (a) Mask with circular microlens arranged in hexagon, (b) mask with circular microlens arranged in square

旋涂在基片上的光刻胶在这样的圆形阵列掩模下曝光显影后,得到的是光刻胶的圆柱阵列,图2(a)给出其中一个圆柱阵列元的轴截面图, H 和 R 分别是圆柱阵列元的高和底面半径;热熔后圆柱形结构在光刻胶表面张力的作用下变成球缺结构;图2(b)是热熔后球缺阵列元的轴截面图, H' 和 R'

分别是球缺阵列元的高和底面半径。在按照图1设计掩模时, d 值取得足够小,可以得到很高的填充因子,考虑到热熔后,阵列元的底面积会有所增加,即 $R' > R$,填充因子得到提高的同时,阵列元可能会相遇,破坏微透镜的形成。因此设计掩模时取 $D = 55 \mu\text{m}$, $d = 5 \mu\text{m}$,即由直径为 $50 \mu\text{m}$ 的圆形微透镜

通过六角排列组成阵列。此时, $\eta_a = 0.749$ 。

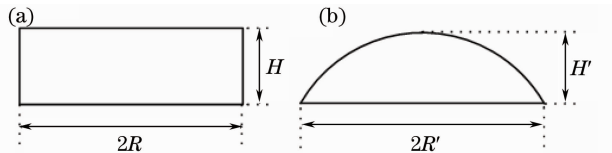


图 2 热熔前(a),后(b)阵列元轴截面

Fig. 2 Cross section of one element of the array before (a) and after (b) melting

3 实 验

用聚合物制作光学元件,通常会采用将光刻胶热熔和图形转移相结合的方法^[8,9]。图 3 给出工艺流程图。基底选用 K9 玻璃。将正性光刻胶 AZ1500 [Clariant (Japan)K. K. 公司提供]以 1000 r/min 的转速旋涂在基底上,时间为 35 s。AZ1500 光刻胶对波长在 310~440 nm 之间的光敏感,将旋涂有 AZ1500 的基片在德国 KARL SUSS MA6 光刻机上,用中心波长为 365 nm,光功率密度为 1 mW/cm² 的紫外线曝光 30 s 后,放入光刻胶显影液中显影 50 s 左右,然后用压缩空气吹干。AZ1500 的熔融温度在 160 ℃~190 ℃之间,将基片上已经曝光显影好的圆柱形阵列放在温度为 190 ℃的恒温炉内加热 15 min 后,关闭恒温炉电源,待冷却至室温时,将其取出备用。此时,圆柱形阵列元已经具有微透镜的形状。将预先配置好的聚二甲基硅氧烷 (PDMS) (由 Dow Corning 公司提供的 PDMS 预聚物和其固化剂按 10:1 的比例混合而成)缓慢地倾倒在热熔好的微透镜阵列上,如图 3(a)所示,然后在温度为 80 ℃的热板上加热一段时间,利用 PDMS 预聚物与其固化剂发生化学反应固化的过程来记录光刻胶的形状。加热时间随 PDMS 的厚度的增加而有所延长,一般在 15~20 min。PDMS 固化后,便可没有粘连地从基片和 AZ1500 上轻轻揭下,得到与微透镜阵列形状相反的模具,即凹透镜阵列,如图 3(b)所示。把 SU-8 胶在 120 ℃的热板上加热。在实验过程中发现:加热时间过长,热交联反应便可使 SU-8 胶完全固化,从而不具有可塑性;加热时间过短,溶剂挥发不充分,SU-8 胶过稀而导致 PDMS 无法顺利揭下。SU-8 胶的加热时间一般在 75 min 左右,溶剂挥发一部分后成熔融状态,然后将其倾倒在基片上,待表面平滑后,把 PDMS 凹透镜阵列小心地覆在 SU-8 胶上,待 SU-8 胶冷却后,SU-8 的表面上就记录下了微透镜阵列,如图 3(c)所示。仔细揭下 PDMS 模具,避免损坏还未完全固化的 SU-8 表面的阵列形

状,再在 MA6 光刻机上,将其用中心波长为 365 nm,光功率密度为 1 mW/cm² 的紫外线曝光 10 min 左右,这时 SU-8 胶与紫外线发生光互联反应,从而完全固化,得到聚合物微透镜阵列。

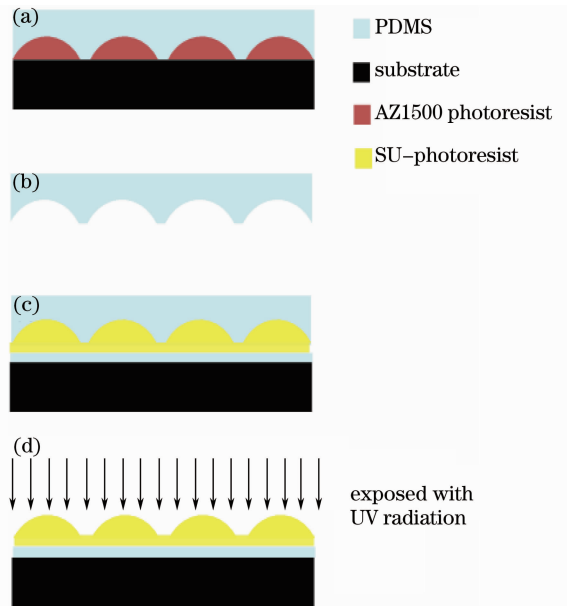


图 3 制作自写入光波导聚合物微透镜阵列的工艺流程

Fig. 3 Technology process of fabricating self-written waveguide polymer microlens array

由于 SU-8 胶是一种高度交联的环氧材料,其中的环氧基在近紫外环境下与 Si 有着很强的结合能力,导致紫外曝光固化后的 SU-8 胶很难从玻璃基片上不被损坏地取下^[13,14]。PDMS 成膜界面自由能较低且具有化学惰性,固化时吸附表面的过程可逆,因此在 SU-8 胶与基片之间,预先铺上一层 PDMS 薄膜,如图 3(d)所示,SU-8 胶紫外固化后,可以顺利地 PDMS 上,而不是从玻璃基片上揭下,避免损坏 SU-8 微透镜阵列。

4 结果与分析

图 4 是光刻胶阵列热熔前圆柱阵列和热熔后微透镜阵列的金相显微镜照片。可以看出,热熔后阵列元的底面积扩张了,但仍然保持形状规则、阵列均匀、边缘清晰,微透镜阵列上有金相显微镜灯丝成的像,说明微透镜面型光滑,可以用来制作与其图像相反的 PDMS 模具。图 5 给出凹透镜阵列即 PDMS 模具在金相显微镜下的照片。

图 6 是 SU-8 胶微透镜阵列在电镜下的三维结构照片。从图 6 可以看出,SU-8 胶微透镜阵列表面结构清晰,说明用 PDMS 薄膜将 SU-8 光刻胶与玻

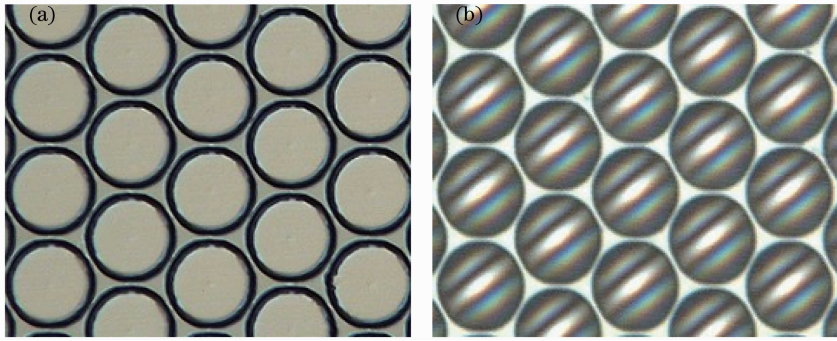


图 4 热熔前(a),后(b)圆柱阵列金相显微照片

Fig. 4 (a) Metallographic microscope picture of cylinder array before (a) and after (b) melting

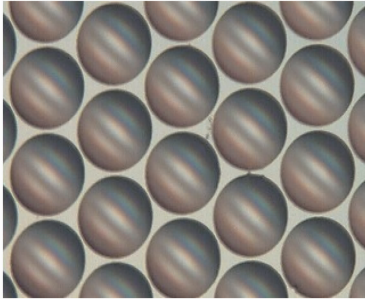


图 5 PDMS 模具的金相显微镜照片

Fig. 5 Metallographic microscope picture of PDMS master

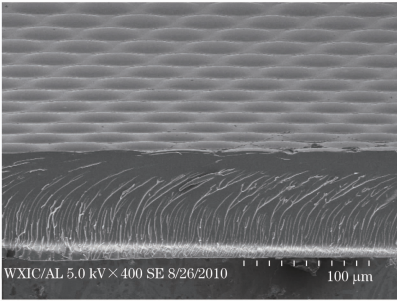


图 6 自写入光波导聚合物微透镜阵列的 SEM 照片

Fig. 6 SEM picture of the self-written waveguide polymer microlens array

璃隔离有很好的效果,而且每个微透镜下端在曝光过程中由于自聚焦作用产生了一个波导。自聚焦作用是强激光束与某些材料相互作用时,材料的折射率发生了与光强有关的变化,导致向前传输的光束的波前发生畸变^[15]。SU-8 光刻胶就是这样一种材料,折射率的增加随着吸收的曝光能量的增加而增加,而且折射率的变化是不可逆的。对于表面带有微透镜阵列的 SU-8 膜,受准平行光 365 nm 紫外线照射时,微透镜表面各点曲率的不同,使光线产生光程差,从而会聚,同时光束横截面的强度分布发生变化,中间强边缘弱,因此,对于阵列中的一个阵列元,

光束横截面中心处的折射率的增加量要大,而边缘的增加量要小,形成一部分锥形结构的波导,如图 7 所示。另外,有限截面的光束还要受到介质结构的衍射作用,当自聚焦作用和衍射作用平衡时,光束在介质中将会传输很长一段距离而其直径保持不变^[15],似细圆柱波导结构,如图 7 所示。

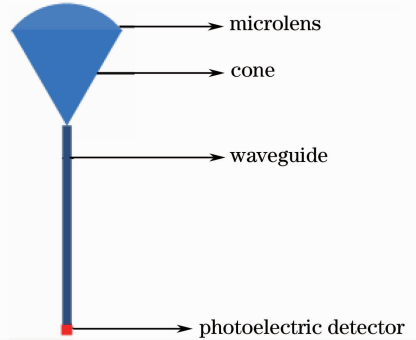


图 7 自写入光波导微透镜与光电探测器耦合示意图

Fig. 7 Illustration of self-written waveguide microlens array coupled with photoelectric detector

图 7 也给出了自写入光波导微透镜阵列与探测阵列的耦合示意图。利用显微成像系统对自写入波导微透镜阵列波导末梢的光点分布进行了测试与分析。图 8 给出了波导末梢光点的二维分布图及某一个光点的三维立体图,可以看出每个光点都独立,波导起到了很好的束光作用,而且阵列呈很好的六角分布。图 9 是对光点阵列均匀性的测试结果,由于显微物镜视场有限的原因,水平方向上给出了 3 个光点的归一化强度,从图中看到 3 条曲线的顶点离中心位置有些许偏离,这是因为在基片上准备隔离基片和 SU-8 光刻胶的 PDMS 薄膜的工艺参数还有待优化。使用优化后的实验参数,期望可以得到波导末梢光点分布更均匀的阵列。

从图 8,9 也可以看到焦点周围有杂散光,在图 9 中表现出的就是极大峰之间的若干小峰。这是

因为微透镜阵列之间有缝隙存在,即填充因子不是100%,微透镜对从缝隙之间出来的光没有聚焦作用。但这些小峰的光强非常弱,对光点的分辨没有

影响。杂散光的消除或者减弱需通过进一步提高填充因子得到解决。

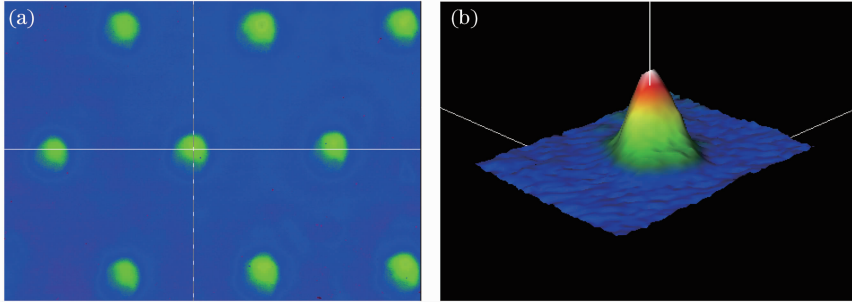


图8 (a)波导末梢光点分布图,(b)其中一个光点的强度分布

Fig. 8 (a) Light spots distribution at the end of the waveguides, (b) intensity distribution of one of those spots in (a)

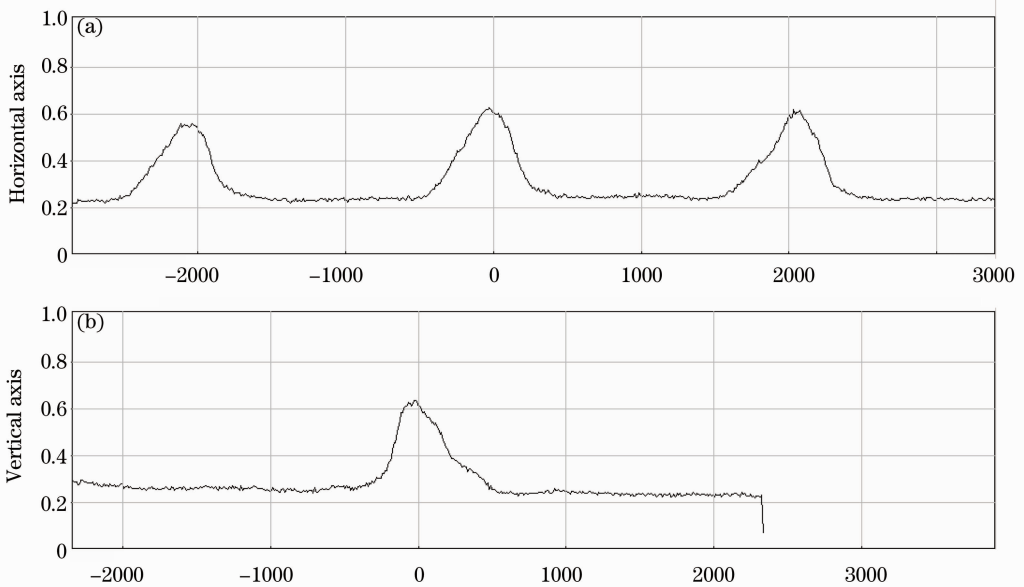


图9 微透镜阵列波导末梢光点分布的均匀性测试

Fig. 9 Uniformity measurement of the light spots at the end of the self-written waveguides of the microlens array

5 结 论

设计了填充因子接近0.75且有自写入波导结构的微透镜阵列,实验过程使用了光刻胶热熔法和图形转移法,工艺简单。采用SU-8胶聚合物作为最后的光学材料制作出了实际填充因子高于设计值的微透镜阵列,并对其波导末端的光点分布进行了测试与分析。结果表明,采用这种流程简单、成本低的工艺制作出的SU-8胶微透镜阵列不仅具有质量轻、体积小特点,而且外观良好,波导末梢光点阵列清晰、强度一致性高,有很高的应用价值。通过优化实验过程中的参数期望可得到质量更佳、外形更好的SU-8胶自写入光波导微透镜阵列。

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]. *Opt. Express*, 2010, **18**(4): 3238~3243
- 2 D. Kuang, X. Zhang, M. Gui *et al.*. Hexagonal microlens array fabricated by direct laser writing and inductively coupled plasma etching on organic light emitting devices to enhance the outcoupling efficiency[J]. *Appl. Opt.*, 2009, **48**(5): 974~978
- 3 Chen Sihai, Yi Xinjian, Kong Linbing *et al.*. Monolithic integration technique for microlens arrays with infrared focal plane arrays[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2002, **43**(2): 109~112
- 4 Du Chunlei, Lin Xiangdi, Zhou Lishu *et al.*. Method for improving performance of infrared detector by micro-optical lens array[J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(2): 246~249
杜春雷,林祥棣,周礼书等.微透镜阵列提高红外探测器探测能力的方法研究[J]. *光学学报*, 2001, **21**(2): 246~249
- 5 Li Heng, Shao Yonghong, Wang Yan *et al.*. Spectrally resolved

- multifocal multiphoton microscopy using microlens array and galvo mirror scanning[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(5): 1240~1244
- 李 恒, 邵永红, 王 岩等. 基于微透镜阵列和振镜扫描的光谱分辨多焦点多光子显微技术[J]. *中国激光*, 2010, **37**(5): 1240~1244
- 6 Qionghua Wang, Huan Deng, Tiantian Jiao *et al.*. Imitating micro-lens array for integral imaging[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2010, **8**(5): 512~514
- 7 Liao Jun, Wang Haidong, Ding Jianping *et al.*. Multiple image produced by micro-lenses array[J]. *Chinese J. Lasers*, 2001, **A28**(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, **A28**(1): 52~54
- 8 Feng Zhao, Mingwei Zhu, Peng Zhan. Microlens arrays prepared via colloidal microsphere templating[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2010, **8**(5): 508~511
- 9 Wang Wei, Zhou Changhe. New technology for fabrication of polymer microlens arrays[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(11): 2869~2872
- 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
- 10 Zhan Zhenxian, Wang Keyi, Yao Haitao *et al.*. Study on curing control and focal spot measurement of aspherical liquid microlens [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(11): 3212~3216
- 詹珍贤, 王克逸, 姚海涛等. 非球面液滴微透镜固化控制和焦斑测量研究[J]. *光学学报*, 2009, **29**(11): 3212~3216
- 11 Wang Xueying, Tian Huiping, Li Changhong *et al.*. Tunable slow light by electro-optic effect in polymer photonic crystal waveguide[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(5): 1374~1378
- 王雪莹, 田慧平, 李长红等. 聚合物光子晶体波导中慢光传输的电光动态调制[J]. *光学学报*, 2009, **29**(5): 1374~1378
- 12 [Http://www.Microchem.Com/products/pdf/su-82000datasheet2000_5thru2015ver4.Pdf](http://www.Microchem.Com/products/pdf/su-82000datasheet2000_5thru2015ver4.Pdf)
- 13 Liu Jingquan, Zhu Jun, Cai Bingchu *et al.*. Experimental research on adhesive characteristics between SU-8 resist and substrate[J]. *Microfabrication Technology*, 2002, (2): 28~32
- 刘景全, 朱 军, 蔡炳初等. SU-8胶与基底结合特性的实验研究[J]. *微细加工技术*, 2002, (2): 28~32
- 14 J. H. Li, D. Chen, J. Y. Zhang *et al.*. Indirect removal of SU-8 photoresist using PDMS technique[J]. *Sensors and Actuators a-Physical*, 2006, **125**(2): 586~589
- 15 Shi Shunxiang, Chen Guofu, Zhao Wei *et al.*. *Nonlinear Optics* [M]. Xi'an: Xidian University Press, 2003
- 石顺祥, 陈国夫, 赵 卫等. *非线性光学* [M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2003