

文章编号 1004-924X(2015)增-0367-07

液滴微喷射与液体模塑法制备柔性微凹透镜阵列

朱晓阳¹, 朱丽^{1*}, 杨利军¹, 陈荷娟¹, 章维一¹, 王洪成²

(1. 南京理工大学机械工程学院, 江苏南京 210094;

2. 南京航空航天大学仿生结构与材料防护研究所, 江苏南京 210016)

摘要:采用液滴微喷射技术与液体模塑法实验研究了微凹透镜阵列的制备。采用微液滴阵列制备实验系统,以甘油水溶液为喷射材料,将其按需喷射到镀有 TiO₂ 纳米粒子的亲水化薄膜玻璃基片上,在界面张力和亲水化效应的作用下,形成 Wenzel 润湿状态下的平凸状微液滴;然后用液体模塑法将微液滴阵列复制到柔性聚二甲基硅氧烷(PDMS)材料上。实验显示:制得的微液滴阵列具有较好的一致性及整齐度,复制得到的微凹透镜阵列在光学显微镜及扫描电子显微镜下均具有较好的几何特性。研究并分析了浇铸 PDMS 液体对在 Young 亲水状态及 Wenzel 亲水状态下的微液滴阵列的形状及位置的影响,结果显示在 Wenzel 亲水状态下的微液滴保持了良好的形状及位置。对制得的微凹透镜阵列进行了简单的成像实验,获得了良好的成像效果。从实验过程和结果可以看出,采用液滴微喷射技术及液体模塑法制备微凹透镜阵列具有过程简单、成本低廉、对制备环境要求低等优点;制备的微凹透镜阵列几何与光学性能优良。

关键词:微凹透镜阵列;液滴微喷射;液体模型

中图分类号:TH703;TP69 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20152313.0367

Preparation of flexible concave microlens array based on micro-jetting and liquid molding method

ZHU Xiao-yang¹, ZHU Li^{1*}, Yang Li-jun¹, Chen He-juan,
ZHANG Wei-yi¹, WHANG Hong-cheng²

(1. School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and
Technology, Nanjing 210094, China;

2. Institute of Bio-inspired Structure and Surface Engineering, Nanjing University of
Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

* Corresponding author, E-mail: nlgzl@163.com

Abstract: The the flexible concave microlens array was fabricated based on the micro-droplet jetting and liquid molding methods. By using jetting fabrication system of micro-droplet array, the glycerin solution was jetted on the glass substrate coated with the hydrophilic film treated by TiO₂ nanoparticles, and a micro-liquid array under the Wenzel state was formed on the glass substrate due to surface tension and hydrophilic effect. Then, the flexible concave was obtained by a liquid molding process using the polydimethylsiloxane(PDMS). The result shows that the micro-droplets are highly homogeneous

收稿日期:2015-04-15;修订日期:2015-05-10.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 51175268);江苏省博士后科研基金资助项目(No. 1402006B);中国博士后科学基金资助项目(No. 2014M551584)

and are well aligned. The final fabricated concave microlens arrays still have good geometric characteristic. The influences of the PDMS mixed liquid casting process on the Wenzel state micro-droplet and Young state micro-droplet were studied and the result shows that the micro-droplet under the Wenzel state keeps an original shape after the mixed PDMS liquid was casted on them. Through the projection image experiment of the concave microlens array, the clear, erected, shrunken and virtual image of the concave micro-lens array was obtained. The experimental process and result indicate that the jetting fabrication of the concave micro-lens array using the micro-droplet jetting technology and liquid molding method has many advantages, such as the simple fabrication process, low cost, low environmental requirements and the final fabricated PDMS concave micro-lens has good geometry and optical performance.

Key words: concave microlens array; micro-jetting; liquid molding

1 引言

自 20 世纪 80 年代微透镜阵列诞生以来,因其具有聚焦、成像、扩散、整形等功能,和微型化、轻量化、阵列化、集成化等特点被广泛应用于光学各领域。目前为止,微透镜阵列的制备水平仍然落后于微透镜阵列的理论设计水平,近年来,已经出现了诸多微透镜阵列的制备方法,但大部分方法制作的仅是平凸状微透镜阵列,而微凹透镜阵列作为微透镜阵列的一种重要类型,在像差调整、光电探测器件、光束扩散、凸形微透镜、曲面微透镜及二元光学元件的匹配耦合等方面具有重要应用。目前,微凹透镜阵列的制备方法主要有飞秒激光酸刻蚀法^[1]、电场诱导去润湿法^[2]、离子束刻蚀法^[3]以及模塑法^[4]等,飞秒激光酸刻蚀法与离子束刻蚀法需要昂贵的设备,效率不高,且无法制备柔性的微凹透镜阵列,电场诱导去润湿引入微孔化的模板加工及空间电场,使得加工步骤变的繁琐。而模塑法更适用于高效快速的柔性微凹透镜阵列的制备。

模塑复制法制备微凹透镜阵列的核心步骤为其阳模的制备,即为微凸透镜阵列结构的制备。微凸透镜阵列的制备方法主要有光刻热熔法^[5]、灰度掩模法^[6]、激光直写法^[7]、离子束光刻法^[8]、热压印成型法^[9]、光诱导交联聚合^[10]、喷墨打印法^[11]等。其中,大部分方法需要多步制备工艺,且需要昂贵的仪器。例如,灰度掩模法步骤繁琐,激光直写与离子束光刻需要昂贵的仪器设备,热压印成型法需要加工相应的微孔模板等。

光刻热熔法及喷墨打印法是制作微凸透镜阵

列的典型方法,具有制作过程简单、成本低等优点。但光刻热熔法存在着无法制备单一透镜及难以制备具有较长焦距、较大 F 数的微透镜等问题^[12],喷墨打印法相比光刻热熔法可在特定基板上制备单一透镜,也可在特定光学器件上制备微透镜。但存在着微喷射所用紫外光固化墨水较为昂贵,墨水黏度较高使得微喷射稳定性及可控性差,制备过程需要特定的无紫外光环境等问题^[13]。

为解决以上问题,本文提出了基于微流体脉冲惯性喷射^[14]与液体模塑法^[15]的柔性微凹透镜阵列制备方法,首先,基于微流体脉冲惯性喷射将甘油水溶液按需微喷射到镀有纳米粗糙结构的亲水化或疏水化基板上,形成甘油水溶液微液滴阵列,然后采用液体模塑法将微液滴阵列复制到柔性材料上,即可制得柔性微凹透镜阵列,整个过程只需两步。柔性材料选择具有化学结构稳定、机械性能好、容易复制、无毒、生物相容等特性的聚二甲基硅氧烷(PDMS),且 PDMS 具有较好的光学特性及柔性,是一种很好的光学材料。

2 实验

2.1 实验材料

实验材料包括:70%甘油水溶液(体积分数),室温下采用旋转黏度计测得其黏度值为 25 mPa·s;TiO₂纳米粒子,赢创德固赛(中国)投资有限公司;PDMS,道康宁 DC SYLGARD 184,美国。

2.2 液滴微喷射实验系统

图 1 所示为微液滴阵列制备系统示意图。在微流体脉冲惯性力的作用下,内构双锥形玻璃微

喷嘴^[16-18]内的甘油水溶液将被喷出。通过改变微流体脉冲惯性力的控制参数(驱动波形、驱动电压幅值,驱动频率,微喷嘴内径等),可以实现不同量的甘油水溶液微喷射。通过协同控制三维工作台的运动,可以完成甘油水溶液微液滴阵列的制备。

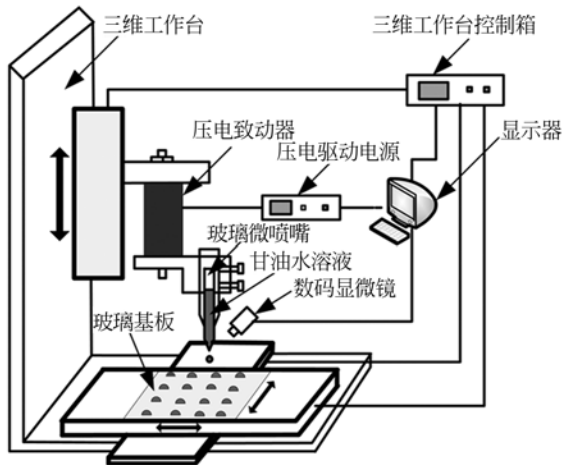


图 1 甘油水溶液微液滴阵列制备示意图

Fig. 1 Sketch of experimental apparatus for micro-jetting fabrication of glycerol micro-droplet array

2.3 液体模塑法制备柔性微凹透镜阵列

PDMS 柔性微凹透镜阵列制备过程主要分为两步:甘油水溶液微液滴阵列的制备与 PDMS 柔性微凹透镜阵列的复制。如图 2 所示,首先在制备甘油水溶液微液滴阵列之前,需要对玻璃基底进行表面处理。待对玻璃基底进行超声清洗后,采用浸渍提拉法对玻璃基底进行亲水化处理,将去离子水与 TiO_2 纳米粒子(质量分数 0.01%)高速剪切搅拌混合制得亲水溶液,然后将洗净的玻璃基底浸渍到亲水溶液中,缓慢提拉出后放入烘箱 120°C 下烘干,即制得所需具有亲水化涂层的玻璃基片。调试系统参数将 70%(体积分数)甘油水溶液微喷射到亲水基板上形成微液滴阵列。其次,在制得微液滴阵列后,将 PDMS 弹性体与固化剂以质量比 10:1 混合、搅拌均匀后,放入真空干燥箱中直至将其中气泡抽干,然后缓慢均匀浇铸到微液滴阵列上,最后将浇铸好的基板平放在真空干燥箱中 60°C 下固化 12 h 后,将固化后的 PDMS 缓慢揭下,将揭下的 PDMS 放入超声清洗仪中用大量纯净水清洗 15 min 后烘干(去除

PDMS 微凹透镜中存留的甘油),即可制得 PDMS 柔性微凹透镜阵列。

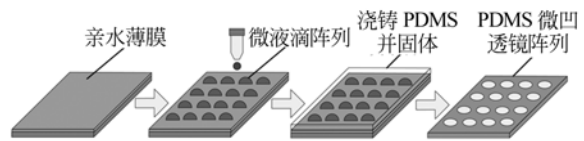


图 2 PDMS 微凹透镜阵列制备示意图

Fig. 2 Sketch of fabrication of PDMS concave micro-lens array

3 实验结果与讨论

3.1 微液滴阵列

液滴微喷射稳定,单次微喷射量均匀是制备甘油水溶液微液滴阵列的前提,依据前期实验结果^[17],设置系统驱动电压幅值为 $30\sim 80\text{ V}$ 、微喷嘴到基板的距离为 1 mm 时微喷射较为稳定。

图 3 所示为制得的甘油水溶液微液滴阵列,制得的甘油水溶液具有较好的一致性及圆整度。通过改变系统控制参数(驱动电压幅值等)可以实现不同尺寸微液滴的制备,具体影响及控制规律在前期实验中已经进行了详尽的研究^[17,19]。

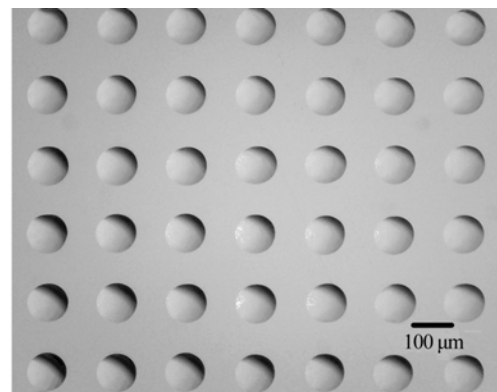


图 3 甘油水溶液微液滴阵列

Fig. 3 Glycerol solution micro-droplet array

3.2 PDMS 柔性微凹透镜阵列

图 4 所示为由微液滴阵列复制得到的 PDMS 微凹透镜阵列,微凹透镜阵列仍然具有较好的形貌及一致性,图 4(a)所示为微凹透镜阵列的俯视图,图 4(b)为微凹透镜侧视图。图 5 所示为微凹透镜阵列的扫描电镜显微图片,进一步表明,通过

微液滴阵列复制而得到的 PDMS 微凹透镜阵列的各微透镜元仍然保持良好的一致性、排列整齐度及透镜圆整度。

模塑法制备微凹透镜阵列过程中,微凹透镜阵列主要由固态的微凸透镜阵列结构复制而得到,大部分微凸透镜阵列结构制备方法较为繁琐,成本相对较高。采用喷墨打印法制备固态微凸透镜阵列过程相对简单,但受光学胶水物理参数的限制,使得制备要求仍然较高。在液滴微喷射的基础上采用液体模塑法制备微凹透镜阵列,在保留液滴微喷射制备微凸透镜阵列结构具有快速、简单、低成本等优势的同时,采用普通甘油水溶液代替了光学胶水,使得微喷射更加灵活、实验环境要求降低、成本也得到了降低。

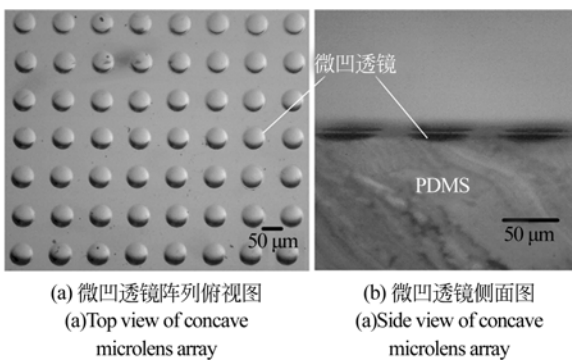


图 4 PDMS 微凹透镜阵列光学显微图

Fig. 4 Optical micrograph of PDMS concave microlens array

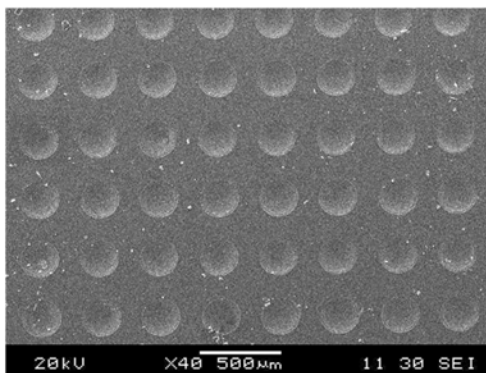


图 5 PDMS 微凹透镜阵列扫描电镜图

Fig. 5 SEM of PDMS concave microlens array

3.3 基板表面处理对制备过程的影响

采用微液滴作为模塑工艺过程的阳模不同于

固体阳模。固体阳模固定于基底,形状及结构均较为固定,在浇铸 PDMS 混合液体时基本不会对固体阳模的结构、形状及位置产生影响。而液体阳模具有流动性,浇铸同样具有流动性的 PDMS 混合液体到微液滴阵列时,对微液滴阵列的形状及位置的影响值得研究和讨论。

液体在固壁表面的接触角通常用来衡量其在固壁上的润湿特性。目前为止,液体在固壁上的润湿性主要由 Young 模型、Wenzel 模型和 Cassie 模型等几种模型来解释。Young 模型如图 6(a)所示,它是固、液、气界面表面张力平衡的结果。当固壁表面存在均一的微米或纳米粗糙结构时,Wenzel 认为粗糙表面使得实际的固液界面的接触面积变大,从而增强了疏水性或亲水性,如图 6(b)所示;当疏水表面上具有微纳粗糙结构时,Cassie 认为粗糙表面上的液滴不能填满其表面上的凹槽,凹槽液滴下存有截留空气^[20]。本实验中,在亲水的玻璃基底上构造了 TiO₂ 纳米粒子粗糙结构,从而使得基底表面表现出更好的亲水性,同时液滴润湿状态属于 Wenzel 模型。由 Wenzel 润湿模型下的液滴具有较大的滚动角或基板对液滴具有较大的粘滞性可知,当 PDMS 液体缓慢浇铸到如图 6(b)所示的 Wenzel 润湿模型下的液滴上时,液滴将保持形状及位置不变,从而确保了微凹透镜阵列的成型质量,如图 4、5 所示。当 PDMS 缓慢浇铸到洁净、光滑的玻璃基板上的微液滴阵列时,微液滴阵列形状被完全破坏,无法形成与微液滴阵列阳模具有较好一致性及整齐度的微凹透镜阵列,如图 7 所示,浇铸洁净、光滑玻璃基板上的微液滴阵列后(如图 7(a)所示),复制得到的却是形状和位置完全变形的微凹透镜阵列(如图 7(b)所示)。据此可知,洁净、光滑的玻璃基板对液滴的黏滞性不高。



图 6 液滴在基板上的润湿模型

Fig. 6 Wetting model of liquid on solid substrate

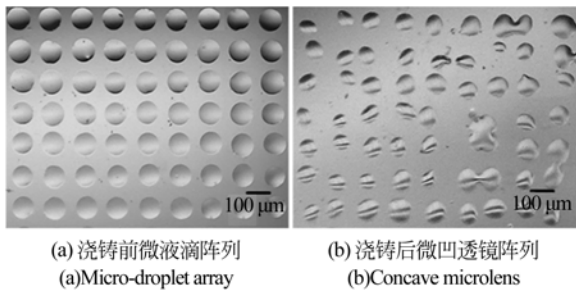


图 7 在未处理光滑玻璃基板上制得的微液滴阵列及微凹透镜阵列

Fig. 7 Fabricated micro-droplet array and concave microlens array on untreated and cleaned solid substrate

3.4 PDMS 柔性微凹透镜阵列的简单性能测试

因微液滴具有较为光滑的表面,故采用液滴模塑法制得的微凹透镜阵列同样具有较好的表面形貌,采用扫描电镜观察所制得微凹透镜阵列表面形貌及表面光滑度,如图 8 所示,从图中可以看出,微凹透镜具有较好的表面光滑度。

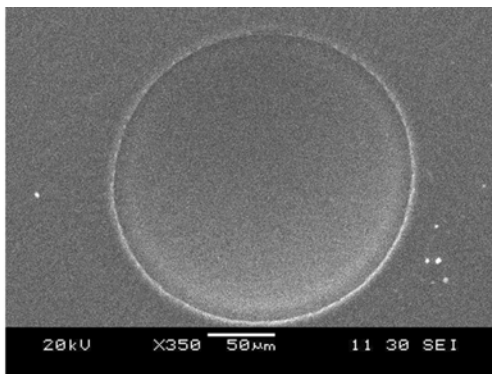


图 8 单个微凹透镜扫描电镜图

Fig. 8 Imaging diagrams of concave micro-lens array

为了验证液体模塑法制得的微凹透镜阵列的光学特性,对其成像质量进行简单测试,搭建如图 9(a)所示成像原理图,在白光源前面放置一张白纸,白纸中间印有单词“Optics”作为光掩模,将微凹透镜阵列置于光掩模与数码显微镜中间,

参考文献:

[1] CHEN F, LIU H, YANG Q, *et al.*. Maskless fabrication of concave microlens arrays on silica glasses

通过调节微凹透镜阵列、数码显微镜及光掩模之间的位置可以成不同的像。如图 9(b)所示,可以形成正立、缩小的虚像。

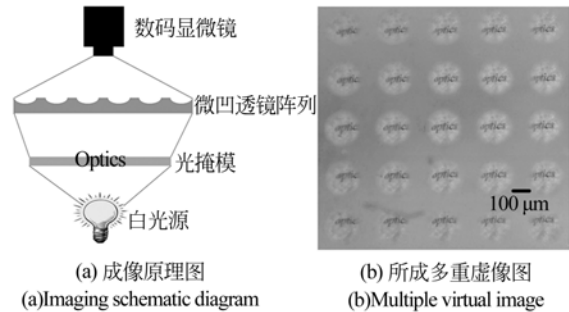


图 9 微凹透镜阵列成像图

Fig. 9 Imaging diagrams of concave micro-lens array

4 结 论

基于液滴微喷射与液体模塑法制备了 PDMS 柔性微凹透镜阵列,采用液滴微喷射法,在亲水化处理的玻璃基片上制得甘油水溶液微液滴阵列,以制得的微液滴阵列作为阳模,经过一步复制工艺制得 PDMS 微凹透镜阵列。通过对玻璃基片镀一层 TiO₂ 纳米颗粒,使得微液滴在基底上的排列更为整齐,且由实验分析可知,纳米粗糙结构上的亲水液滴润湿状态为 Wenzel 模型,基底对微液滴具有较好的粘滞性,保证了 PDMS 液体浇铸过程中微液滴阵列保持良好的尺寸及位置精度。通过实验,精确制备出了具有较好一致性的 PDMS 微凹透镜阵列。在光学显微镜及扫描电子显微镜下均具有良好的表面形貌。由液滴复制而得到的 PDMS 微凹透镜阵列表现出了良好的表面粗糙度,且成像效果良好。基于液滴微喷射技术,结合液体模塑法的 PDMS 柔性微凹透镜阵列制备具有制作过程简单、成本较低、制备的微凹透镜表面形貌较好,对实验条件要求低等特点。

by a femtosecond-laser-enhanced local wet etching method [J]. *Optics Express*, 2010, 18 (19): 20334-20343.

[2] LI X, DING Y, SHAO J, *et al.*. Fabrication of mi-

- cro lenses arrays with well-controlled curvature by liquid trapping and electrohydrodynamic deformation in microholes [J]. *Advanced Materials*, 2012, 24 (23): 165-169.
- [3] 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.
- ZHANG X Y, TANG Q L, ZHANG Z, *et al.*. Concave refractive microlens arrays fabricated by ion beam etching [J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, 21 (4): 485-490. (in Chinese)
- [4] LI F, CHEN S H, LUO H, *et al.*. Fabrication and characterization of polydimethylsiloxane concave microlens array [J]. *Optics & Laser Technology*, 2012, 44(4): 1054-1059.
- [5] ODER T N, SHAKYA J, LIN J Y, *et al.*. Nitride microlens arrays for blue and ultraviolet wavelength applications [J]. *Applied Physics Letters*, 2003, 82(21): 3692-3694.
- [6] YUAN X C, YU W, NGO N, *et al.*. Cost-effective fabrication of microlenses on hybrid sol-gel glass with a high-energy beam sensitive gray-scale mask [J]. *Optics Express*, 2002, 10(7): 303-308.
- [7] HE M, YUAN X C, NGO N Q, *et al.*. Single-step fabrication of a microlens array in sol-gel material by direct laser writing and its application in optical coupling [J]. *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics*, 2004, 6(1): 94.
- [8] 何苗, 刘鲁勤. 大 F 数硅微透镜阵列的制作及光学性能测试研究[J]. *中国激光*, 2000, 27(12): 1097-1102.
- HE M, LIU L Q. Research on fabrication and optical performance testing of silicon microlenses array with large F/number [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2000, 27(12): 1097-1102. (in Chinese)
- [9] ONG N S, KOH Y H, FU Y Q. Microlens array produced using hot embossing process [J]. *Microelectronic Engineering*, 2002, 60(3): 365-379.
- [10] CROUTXE-BARGHORN C, SOPPERA O, LOUGNOT D J. Fabrication of microlenses by direct photo-induced crosslinking polymerization [J]. *Applied Surface Science*, 2000, 168(1): 89-91.
- [11] KIM J Y, PFEIFFER K, VOIGT A, *et al.*. Directly fabricated multi-scale microlens arrays on a hydrophobic flat surface by a simple ink-jet printing technique [J]. *Journal of Materials Chemistry*, 2012, 22(7): 3053-3058.
- [12] O'NEILL F T, SHERIDAN J T. Photoresist reflow method of microlens production Part I: Background and experiments [J]. *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, 2002, 113(9): 391-404.
- [13] VOIGT A, OSTRZINSKI U, PFEIFFER K, *et al.*. New inks for the direct drop-on-demand fabrication of polymer lenses [J]. *Microelectronic Engineering*, 2011, 88(8): 2174-2179.
- [14] ZHU X Y, ZHU L, CHEN H J, *et al.*. Fabrication of multi-scale micro-lens arrays on hydrophobic surfaces using a drop-on-demand droplet generator [J]. *Optics & Laser Technology*, 2015; 66: 156-165.
- [15] LIU X, WANG Q, QIN J, *et al.*. A facile "liquid-molding" method to fabricate PDMS micro-devices with 3-dimensional channel topography. *Lab Chip*, 2009; 9(9): 1200-1205.
- [16] 王洪成, 侯丽雅, 章维一, 等. 驱动电压波形修圆对微流体脉冲惯性力和驱动效果的影响 [J]. *光学精密工程*, 2012, 20(10): 2251-2259.
- WANG H CH, HOU L Y, ZHANG W Y, *et al.*. Influence of rounded driving voltage waves on micro-fluidic pulse inertial force and driving effects [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(10): 2251-2259. (in Chinese)
- [17] 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).
- ZHU X Y, HOU L, ZHENG Y, *et al.*. Fabrication of polymer micro-lens array by micro-fluid digitalization [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22 (2): 360-368. (in Chinese)
- [18] 杨眉, 朱丽, 侯丽雅, 等. 数字化微喷射用玻璃基组合微喷嘴设计及应用 [J]. *光学精密工程*, 2012, 20(7): 1580-1586.
- YANG M, ZHU L, HOU L Y, *et al.*. Design and experiment of vitreous combined micronozzles used in digital micro injection [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(7): 1580-1586. (in Chinese)
- [19] ZHU X Y, ZHU L, CHEN H J, *et al.*. Fabrication of high numerical aperture micro-lens array

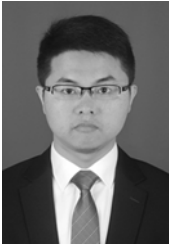
based on drop-on-demand generating of water-based molds [J]. *Optics & Laser Technology*, 2015, 68: 23-27.

[20] 李小兵, 刘莹. 固体表面润湿性机理及模型[J].

功能材料, 2008, 38(A10): 3919-3924.

LI X B, LIU Y. Wetting mechanisms and models on solid surfaces [J]. *Journal of functional material.*, 2008, 38(A10): 3919-3924. (in Chinese)

作者简介:



朱晓阳(1988—),男,山东临沂人,博士研究生,2010年于烟台大学获得学士学位,主要从事微流体驱动-控制技术及其应用、机械制造及自动化、微光学器件制作等方面的研究。E-mail: zhuxy1026@163.com



杨利军(1989—),男,江苏金坛人,博士研究生,2012年与南京理工大学获得学士学位。主要从事微流体-驱动控制技术及其应用、微机电、微流控芯片等方面的研究。E-mail: fulisayang@163.com