

文章编号 1004-924X(2014)02-0360-09

微流体数字化技术制备聚合物微透镜阵列

朱晓阳, 侯丽雅*, 郑悦, 王洪成, 章维一
(南京理工大学机械工程学院, 江苏南京 210094)

摘要: 基于微流体数字化技术搭建了聚合物微透镜阵列按需喷射制备实验系统。以 UV 固化胶为喷射材料, 将其按需喷射到镀有疏水化薄膜的玻璃基片上, 在界面张力和疏水化效应的作用下, 形成平凸状的微液滴, 再经紫外光固化后形成微透镜阵列。实验研究了系统参量对稳定微喷射与微透镜直径的影响, 稳定微喷射出了黏度值为 $50 \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 的 UV 胶, 制得了最小直径达 $25 \mu\text{m}$ 的微透镜, 进而制备出了直径变异系数 $C \cdot V$ 达 0.64% 、焦距均匀性误差为 1.7% 的 15×15 微透镜阵列。微透镜在扫描电子显微镜下具有较好的表面形貌, 采用白光干涉/轮廓仪(VSI 模式)测得其轮廓算术平均偏差 R_a 为 247.99 nm (扫描区域: $29.4 \mu\text{m} \times 39.3 \mu\text{m}$), 扫描区域轮廓曲线平滑。通过微透镜阵列的成像实验, 得到了微透镜阵列所成的清晰实像。实验结果表明, 采用微流体数字化技术进行聚合物微透镜阵列的按需喷射制备过程简单、成本低廉、工艺参数稳定; 制备的微透镜阵列几何与光学性能优越。

关键词: 微光学器件; 微流体数字化; 按需喷射; 紫外光固化胶; 聚合物微透镜阵列

中图分类号: Q819; TP273 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20142202.0360

Fabrication of polymer micro-lens array by micro-fluid digitalization

ZHU Xiao-yang, HOU Li-ya*, ZHENG Yue, WANG Hong-cheng, ZHANG Wei-yi

(School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and
Technology, Nanjing 210094, China)

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

Abstract: On the basis of the digitalization of microfluids technology, an experimental system for the drop-on-demand (DOD) jetting fabrication of micro-lens array was constructed. The UV-curable adhesive was taken as the jetting material and it was jetted on the glass substrate coated with the hydrophobic film. Then, liquid plano convex micro-droplet could be formed on the glass substrate by surface tension and hydrophobic effect, and the micro-lens array was obtained after the UV light polymerization at a room temperature. The influences of the system parameters on the stable micro-jetting and the diameter of micro-lens were researched. Results show that the UV-curable adhesive with a viscosity of $50 \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ can be obtained in stable micro-jetting and the micro-lens with a diameter of $25 \mu\text{m}$ is prepared. Furthermore, a 15×15 micro-lens array is obtained by experiments with the coefficient of variation diameter of 0.64% and non-uniformity of the focal length of 1.7% . The micro-lens shows a good surface morphology in a Scanning Electron Microscopy (SEM) and its surface roughness is 247.69 nm (scanning area: $29.4 \mu\text{m} \times 39.3 \mu\text{m}$) by the white light interferometer (VSI

收稿日期: 2013-10-19; 修订日期: 2013-11-19.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 51175268, 11102090); 高等学校博士学科点专项科研基金资助项目 (No. 2011321910004)

mode) and the profile curves of the scanning area are smooth. Through the projection image experiment of the micro-lens, the clear real image of the micro-lens array is obtained. Experimental results indicate that the DOD jetting fabrication of the micro-lens array based on the digitalization of microfluids technology has advantages of simple process, low costs, stable process parameters and the micro-lens has good geometry and optical performance.

Key words: micro-optical device; microfluid digitalization; drop-on-demand; UV-curable adhesive; polymer micro-lens array

1 引言

2000年以来,微光学器件在现代工业中受到了广泛的重视和研究^[1]。其中,微透镜和微透镜阵列作为一种典型的微光学器件被广泛应用于光学信息处理、光束整形、光学器件互连、三维成像以及仿生复眼等领域。近年来,聚合物微透镜因其具有更大的设计自由度、机械性质和热学性质良好、质量轻及制作过程简便等优点而得到了广泛的关注和研究。目前,聚合物微透镜及其阵列的主要制备方法有光刻胶回流法^[2]、热压印成形法^[3]、灰度掩模法^[4]、光诱导交联聚合^[5]、激光直写法^[6]和微喷打印法^[7]等。其中,大部分方法工艺过程繁琐,制作成本较高。例如,灰度掩模法根据微透镜的面型对掩模板进行灰度编码形成相应的光强透过率分布函数,利用灰阶掩模板调节基板上不同位置光刻胶的曝光量,从而在显影后形成光刻胶浮雕图形,经刻蚀后可在基底材料上获取所需的面形。然而,多灰阶掩模的制作困难,费用昂贵,且在曝光过程中图形转印难以控制使面形不易精确控制。

近年来,采用微喷打印法制作聚合物微透镜吸引了国内外学者的广泛兴趣,因其具有制作简单、灵活,成本低,工艺参数稳定且易于控制等优点而被广泛研究和应用。该方法既可制作单一透镜器件,也可在所需光学器件上定量、定位制作微透镜形成光学组件,是一种工艺简单、灵活且材料利用率接近100%的制作技术,具有极大的发展潜力与价值。按照液滴形成驱动原理的不同,微喷打印法主要分为容积式压电驱动与气压驱动。容积式压电驱动具有响应速度快,频响范围宽等特点,但存在微喷头不易拆卸、清洗与维修等问题。气压驱动具有操作简单、方便,适用范围广等

特点,但存在喷射不稳定、液滴可控性差等问题。国外最具代表性的为瑞士的洛桑联邦理工学院Joo Yeon Kim等采用挤压型的压电式微喷打印法,运用ORMOCER类混合聚合物在镀有疏水化薄膜的玻璃基片上精确制备出了几十个微米尺寸的微透镜^[8-10],但存在微喷射材料昂贵,喷射液体黏度较小(低于 $30 \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$),难以喷射较高黏度液体等问题。国内最具代表性的为华中科技大学谢丹等人使用气动膜片式按需液滴微喷射法喷射UV固化胶制作的微透镜阵列,这些微透镜阵列具有较好的几何与光学性能^[11],但液滴可控性差,难以实现较小直径微透镜(通常大于 $50 \mu\text{m}$)的制备。

微流体脉冲驱动-控制技术(也称微流体数字化技术)作为一种无内嵌微可动件、控制方法简单、对流体物理性质无影响的微流体驱动方法,以脉冲流动为微流动基本形态,以脉冲惯性力为主动动力,适用于各种液体和粉体,液体喷射量分辨率可达飞升级^[12-13]。近年来,南京理工大学微系统研究室对微流体脉冲驱动-控制技术及其在生物、化学等领域的应用以及相应的微流体器件的制备方面上展开了一系列研究^[14-16]。

本文基于微流体数字化技术搭建了聚合物微透镜阵列按需喷射制备系统,将UV固化胶按需喷射到镀有疏水水化薄膜的玻璃基片上,在界面张力和疏水化效应的作用下,形成平凸状的微液滴,通过协调控制微流体脉冲驱动-控制参数与工作台运动参数制得了微液滴阵列,经过紫外光固化后,制得了微透镜阵列。

2 实验

2.1 实验材料

实验材料包括:光固化UV胶,其黏度值为

$50 \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ (25 °C, 旋转黏度计 NDJ-1、4 # 转子、12 r/min 条件下测得), 其他性能指标如表 1 所示, 广东东莞易品电子有限公司; 浓硫酸、丙酮, 上海凌峰化学试剂有限公司; 氨基丙烯酸树脂、二甲苯, 国药集团化学试剂有限公司; SiO_2 纳米粒子, 固赛(中国)投资有限公司。

表 1 UV 胶材料性能指标

Tab. 1 Materials performance of UV-curable adhesive

外观	黏度 /Pa·s	硬化条件 (mJ·cm ⁻²)	折射率	硬度	成膜厚度 /μm	附着力
无色, 透明	50×10^{-3}	800~1 000	1.38	≥6 Hv	2~6	0 级

2.2 实验系统

图 1 所示为聚合物微透镜阵列按需喷射制备实验系统, 主要由压电驱动-控制系统、压电致动器、三维工作台及其控制箱、数码显微镜、微喷嘴和计算机等构成。实验中所使用的压电致动器为德国 PI 公司生产的 P-844. 10 型压电陶瓷, 以压电致动器为作动器的微流体脉冲驱动-控制参数是指压电驱动-控制系统提供给压电致动器的驱动电压波形、驱动电压幅值(V)和驱动频率(f_0), 其中驱动波形选择有利于液体喷射的陡升缓降波形^[17], 如图 1 所示。电压幅值为 0~80 V, 频率为 2~256 Hz。微喷嘴内的液体在压电致动器的作用下将获得足够大的脉冲惯性力并克服黏性力从喷头处喷出。通过协调控制微流体脉冲驱动-控制参数与工作台运动参数, 可以实现液体的定量、定位喷射, 即按需喷射。

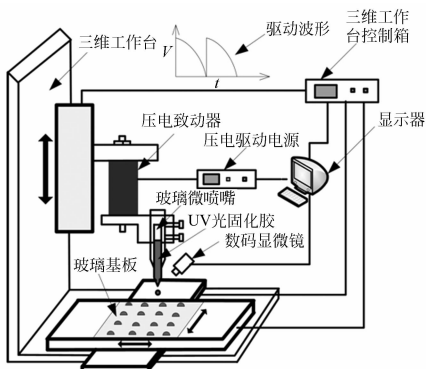


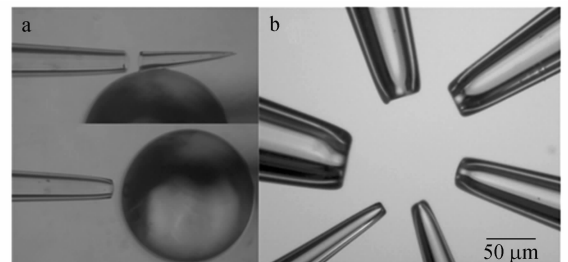
图 1 聚合物微透镜阵列按需喷射制备实验系统示意图

Fig. 1 Sketch of experimental apparatus for DOD jetting fabrication of polymer micro-lens array

玻璃微喷嘴为聚合物微透镜阵列按需喷射制备系统的核心器件, 采用普通的硼硅酸盐玻璃毛细管(内径为 0.6 mm, 外径为 1.0 mm)经拉制器^[18]拉制、锻针仪(MF-900, 日本 Narishige 公司)截取与锻制三步制作而成。最终得到的微喷嘴为内构双锥形, 图 2(a)为微喷嘴的截取和锻制过程, 图 2(b)为所制作的不同出口内径的内构双锥形微喷嘴。

2.3 微透镜阵列的制备实验

聚合物微透镜阵列按需喷射制备过程主要分为玻璃基片的处理、微液滴阵列喷射成型与固化。首先要对玻璃基片进行洁净处理, 将玻璃片放入烧杯中, 倒入适量的浓硫酸, 放在加热炉上加热 10 min, 然后取出冷却 10 min, 用去离子水冲洗残余的浓硫酸。用棉球擦干后放入含有丙酮的烧杯中, 放入超声波清洗仪中震荡 10 min, 取出后用去离子水冲洗干净, 并将其表面水分吹干。其次对玻璃基片表面进行疏水化处理, 采用溶胶-凝胶法制备疏水化薄膜, 以氨基丙烯酸树脂为成膜树脂, 二甲苯为溶剂, 与 SiO_2 纳米粒子高速剪切搅拌混合, 静置、沉化后即制得溶胶悬浮液。采用喷涂的方法, 将制成的悬浮液均匀涂覆在洁净处理的玻璃基片上, 静置一段时间后放入烘箱, 在 150 °C 固化 20 min, 即制得所需具有疏水化涂层的玻璃基片^[19]。最后调试系统参数微喷射成型微液滴阵列, 经固化后得微透镜阵列, 制备过程如图 3 所示。



(a) 微喷嘴的截取与锻制 (b) 不同出口内径的微喷嘴
(a) Cutting off and forging (b) Micro-nozzles with different inner diameters

图 2 微喷嘴显微照片

Fig. 2 Micrographs of micro-nozzles

微透镜形状与玻璃基片的清洁度、疏水化处理密不可分, 如表面有杂质, 会造成液滴与其接触面不圆整, 会降低微透镜的一致性, 严重时会在图

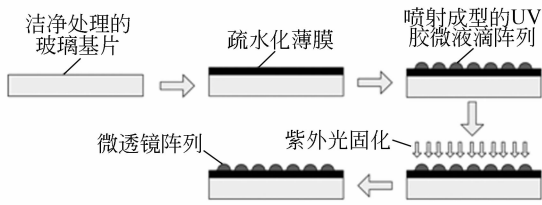


图3 微透镜阵列制备过程

Fig. 3 Fabrication process of polymer micro-lens array

形结构上造成较大的缺陷,形成废品。同样,疏水化处理的玻璃基片对微透镜形状的改变有很大的影响。疏水化处理的作用主要有两个:(1)提高微液滴的接触角,由于所用UV胶材料其表面张力较低(成膜厚度为 $2\sim 6\ \mu\text{m}$),在普通玻璃基板上形成的液滴接触角很小,为了提高所制得微透镜的光学性能,需要对玻璃基片进行疏水化处理,使得所制得微透镜的接触角有一定的提高(采用接触角的液滴高度/宽度估算法计算得接触角约为 50°);(2)提高制得微透镜的圆整性,均匀的疏水化处理会提高所制得微透镜的圆整性。图4为在疏水化处理不均匀的玻璃基片上制得的微透镜的SEM图,从图中可以看出,微透镜的圆整度较差。

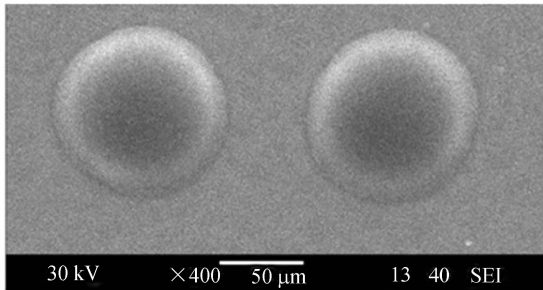


图4 边缘缺陷的微透镜 SEM图

Fig. 4 SEM image of micro-lens with edge defects

实现微液滴稳定喷射是制备高一致性聚合物微透镜阵列的前提,即微喷射出的液滴不含卫星液滴,且每次微喷射量均匀。在聚合物按需喷射制备系统中,诸多因素与卫星液滴的产生、均匀的微喷射量有关,实验研究了系统参量对卫星液滴的产生,稳定、均匀的微喷射量的影响。为了得到多尺度的微透镜,提高微透镜尺寸的可控性,实验研究了系统参量对微透镜直径(D)的影响。系统参量是指系统驱动控制参量(包括电压幅值 V 、驱动频率 f_0)和其他参量(包括微喷嘴喷头到基板

距离(S)、微喷嘴内径(d)与单个微透镜的液滴数(n_0)),由于本文使用的脉冲驱动波形为陡升缓降波形,脉冲宽度(t_w)的大小与变化规律决定于电压幅值 V 、驱动频率 f_0 的大小与变化规律,即 t_w 对微透镜的制备过程的影响规律可以由电压幅值 V 、驱动频率 f_0 对微透镜制备过程的影响规律体现。

3 实验结果与分析

3.1 系统参量对稳定喷射的影响

对系统参量对卫星液滴产生的影响进行了研究,结果显示卫星液滴的产生主要和电压幅值 V 的大小和微喷嘴喷头到基板距离 S 有关, V 和 S 对卫星液滴的影响规律如表2所示。从结果可以看出,当 V 或 S 过大时易产生卫星液滴(微喷嘴内径 $d=10\ \mu\text{m}$,频率 $f_0=2\ \text{Hz}$,液滴数 $n_0=1$)。

表2 驱动电压(V)与喷头到基板距离(S)对卫星液滴产生的影响

Tab. 2 Variation of driving voltage and distance between micro-nozzle and substrate with satellite droplets

		喷头到基板距离 S/mm			
		2	1.5	1	0.5
驱动电压 / V	30	Y	Y	N	N
	40	Y	Y	N	N
	50	Y	Y	N	N
	60	Y	N	N	Y
	70	Y	N	N	Y
	80	Y	N	Y	Y

(注:“Y”表示有卫星液滴产生,“N”表示没有卫星液滴产生)

为了获得稳定、均匀的微喷射量,对系统参量对微喷射量的影响进行了研究,结果显示稳定、均匀的微喷射量的影响因素主要为电压幅值 V 、驱动频率 f_0 和微喷嘴内径 d ,并得到其稳定、均匀微喷射的参数 V 为 $30\sim 80\ \text{V}$, f_0 为 $2\sim 20\ \text{Hz}$, d 为 $5\sim 110\ \mu\text{m}$ 。当超出这个范围时,会出现微喷射不稳定(时而喷射,时而不喷)或喷射量不均匀(时而液滴大,时而液滴小)的现象。原因可能是系统提供的惯性力大小与液体的黏性力以及表面张力的大小接近,使得系统的惯性力不能每次都克服黏性力和表面张力而形成稳定喷射。

3.2 系统参量对微透镜直径的影响

研究了系统参量对微透镜直径 D 的影响,结果显示,微透镜直径 D 的影响因素主要包括驱动频率 f_0 、微喷嘴内径 d 、液滴数 n_0 与电压幅值 V 。

3.2.1 驱动频率与微喷嘴内径对微透镜直径的影响

实验条件: $V=80\text{ V}$, d 为 $10\sim 100\ \mu\text{m}$, f_0 为 $2\sim 20\text{ Hz}$, $n_0=1$;图 5 所示为系统驱动频率 f_0 、微喷嘴内径 d 对微透镜直径 D 的影响曲线,从图中可以看出,微透镜的直径 D 随 f_0 的增大而减小,随 d 的增大而增大;驱动频率 f_0 越小, d 对 D 影响越大。微喷嘴直径 d 越大, f_0 对 D 影响越大。当微喷嘴内径 d 为 $10\sim 100\ \mu\text{m}$,驱动频率 f_0 在 $2\sim 20\text{ Hz}$ 变化时,可制得 D 在 $25\sim 315\ \mu\text{m}$ 之间的微透镜。图 7(a)为微喷嘴内径 d 为 $10\sim 100\ \mu\text{m}$ 时制得的微透镜光学显微图($V=80\text{ V}$, $f_0=2\text{ Hz}$, $n_0=1$)。

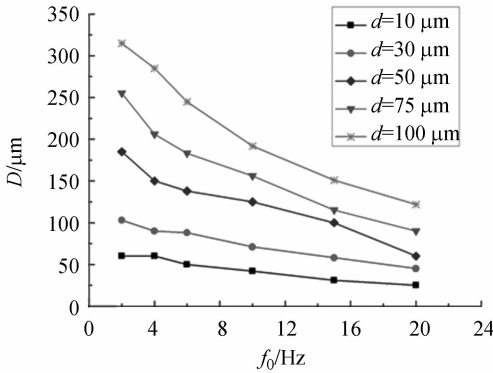


图 5 驱动频率与微喷嘴内径对微透镜直径的影响
Fig. 5 Variation of driving frequency and micro-nozzle inner diameter with the diameter of micro-lens

3.2.2 液滴数与电压幅值对微透镜直径的影响

实验条件: $f_0=2\text{ Hz}$, $d=100\ \mu\text{m}$ 。图 6 所示为液滴数 n_0 与电压幅值 V 对微透镜直径 D 的影响曲线,从图中可以看出,驱动电压 V 越大, n_0 对 D 的影响越大。在该实验中,当液滴数 n_0 在 $1\sim 50$ 变化时,可以制得 D 为 $100\sim 1\ 300\ \mu\text{m}$ 的微透镜。图 7(b)为液滴数 n_0 为 $1\sim 50$ 时制得的微透镜光学显微图($V=30\text{ V}$, $f_0=2\text{ Hz}$, $d=100\ \mu\text{m}$)。

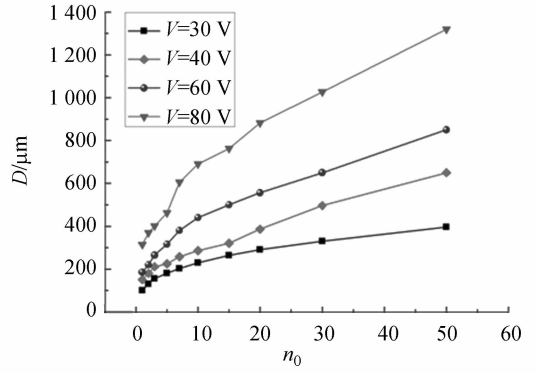
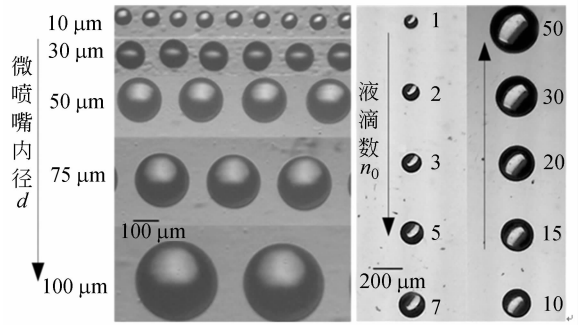


图 6 液滴数与电压幅值对微透镜直径的影响
Fig. 6 Variation of number of drops per micro-lens and the driving voltages with the diameter of micro-lens



(a) 不同微喷嘴内径下制得的微透镜
(b) 不同液滴数下制得的微透镜
(a) Micro-lenses with different micro-nozzle inner diameters
(b) Micro-lenses with different numbers of drops per micro-lens

图 7 不同参数下制得的微透镜

Fig. 7 Micro-lenses with different fabrication parameters

4 微透镜阵列性能检测

微透镜阵列的检测方法与普通透镜不同,参照 ISO 组织提出的微透镜的检测方法,并结合已有的实验条件对微透镜进行了几何参数指标和光学性能指标两个方面的性能测试。

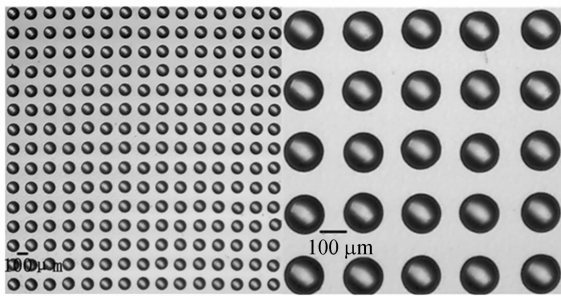
4.1 微透镜阵列的一致性分析

图 8 为在玻璃基片上制作的不同放大倍数下的微透镜光学显微图,从图中随机挑选 50 个微透镜进行测量,结果显示微透镜的平均直径为 $140.29\ \mu\text{m}$,平均矢高为 $32.94\ \mu\text{m}$ 。微透镜直径的一致性曲线如图 9 所示,采用变异系数 $C \cdot V$

来表征微透镜直径的一致性,其计算公式为:

$$C \cdot V = (S/\bar{x})100\% , \quad (1)$$

其中: S 为微透镜直径的标准差, \bar{x} 为微透镜直径的平均值。采用上式计算得微透镜直径变异系数 $C \cdot V$ 达 0.64%。



(a) 俯视 ×150 (b) 俯视 ×400
(a) Top view ×150 (b) Top view ×400

图 8 15×15 微透镜阵列光学显微图

Fig. 8 Optical micrographs of 15×15 micro-lens array

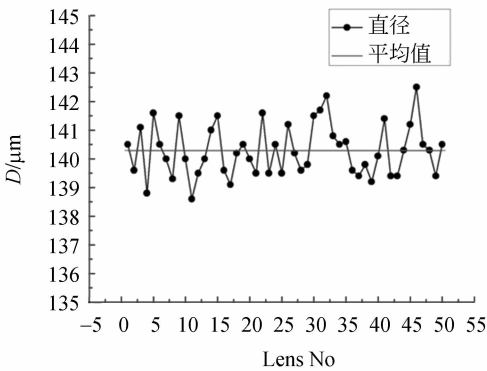


图 9 一致性分析

Fig. 9 Uniformity analysis of 50 randomly selected micro-lenses

4.2 微透镜的表面质量测试

图 10 为扫描电子显微镜下的微透镜,从图中可以看出,微透镜具有较好的轮廓和表面形貌。

为了进一步测定所制得微透镜的表面质量,采用白光干涉/轮廓仪 (Veeco wyko NT9100, VSI 模式) 测定了所制得微透镜的表面粗糙度及轮廓,扫描区域为 $29.4 \mu\text{m} \times 39.3 \mu\text{m}$ 。测得表面粗糙度的轮廓算术平均偏差 R_a 为 247.99 nm,均方根粗糙度 R_q 为 298.60 nm,如图 11(a)所示。由图 11(b)可以看出扫描区域具有较平滑的轮廓曲线。由此可见,所制得的微透镜具有较好的表面光滑度。

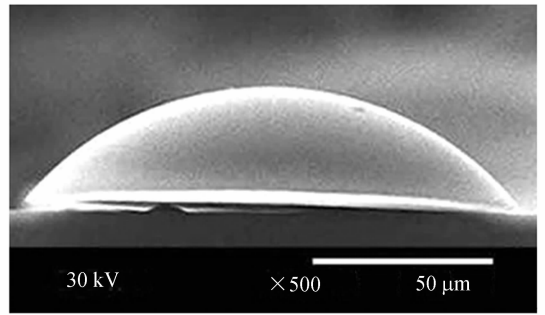
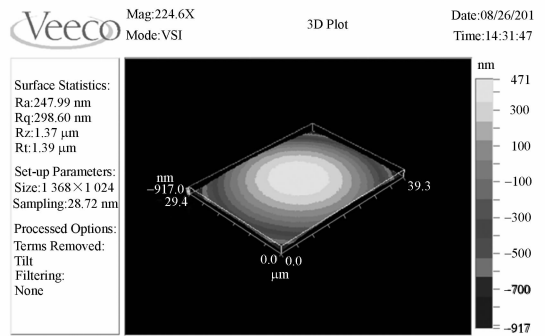


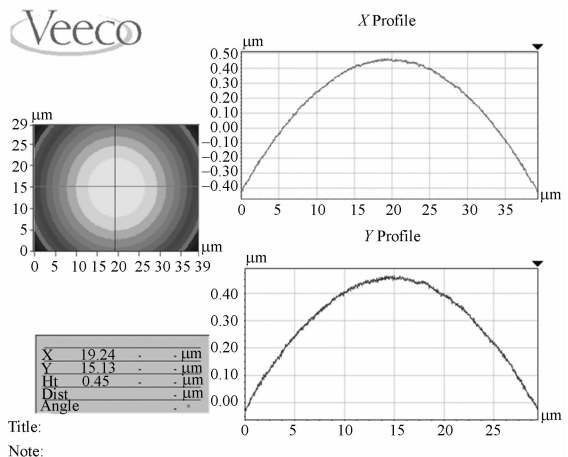
图 10 微透镜的 SEM 图(直径:140.5 μm,矢高:32.9 μm)

Fig. 10 SEM image of micro-lens (diameter: 140.5 μm, height: 32.9 μm)



(a) 微透镜的表面粗糙度

(a) Surface roughness of micro-lens



(b) 微透镜表面轮廓曲线

(b) Profile lines of micro-lens

图 11 微透镜表面粗糙度与轮廓

Fig. 11 Surface roughness and profile of micro-lens

4.3 微透镜光学参数的计算

为了统计分析所制得微透镜的光学参数,可以通过光学显微镜和 SEM 测得的微透镜的直径

(D)和矢高(h)来计算微透镜的焦距(f)、数值孔径(NA)以及 f 数。微透镜的焦距 f 与微透镜的曲率 R_c 有关,而曲率 R_c 与微透镜的直径和矢高有关:

$$f = R_c / n - 1, \quad (2)$$

其中 K 为非球面参数,当透镜剖面为球形时, $K=0$,为椭圆形时, $-1 < K < 0$ 或 $K > 0$,为双曲线型时, $K < -1$,为抛物线型时, $K = -1$ 。由于所制得的微透镜为平凸型,故 $K=0$ 。

$$R_c = (K+1)h/2 + (D/2)^2/2h. \quad (3)$$

将式(3)代入式(2)即可得出焦距 f 的计算公式:

$$f = R_c / n - 1 = (D^2 + 4h^2) / 8h(n-1). \quad (4)$$

数值孔径 NA 与透镜直径和焦距有关,其关系为:

$$NA = D/2f, \quad (5)$$

NA 为决定微透镜成像分辨率和成像质量的一个重要参数。同样 f 数与微透镜的直径和焦距有关,其关系为:

$$f_{\#} = f/D. \quad (6)$$

表 3 随机选取的 10 个微透镜的直径、矢高、焦距、数值孔径与 f 数

Tab. 3 Diameters, heights, focal lengths, NA and f -number of 10 micro-lenses randomly chosen from micro-lens array

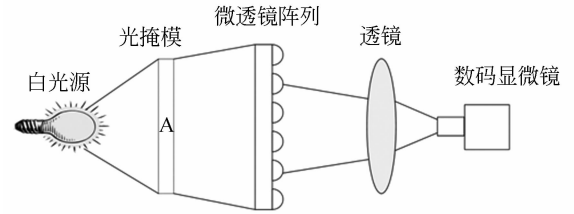
序号	直径 $D/\mu\text{m}$	矢高 $h/\mu\text{m}$	焦距 $f/\mu\text{m}$	NA	f 数
1	140.5	32.9	240.66	0.29	1.71
2	139.5	32.5	239.72	0.29	1.72
3	141.2	33.1	241.69	0.29	1.71
4	140.2	32.6	241.23	0.29	1.72
5	139.6	31.7	243.94	0.29	1.75
6	139.8	32.5	240.58	0.29	1.72
7	141.5	33.5	240.68	0.29	1.70
8	141.7	33.4	241.70	0.29	1.71
9	142.2	33.9	240.82	0.30	1.69
10	140.8	33.3	239.65	0.29	1.70

通过测量和计算,得出制得微透镜的直径为 $25.0 \sim 1300.2 \mu\text{m}$,矢高为 $5.8 \sim 302.9 \mu\text{m}$,焦距为 $32.65 \sim 1697.75 \mu\text{m}$ 。从所制得 15×15 微透镜阵列中随机取 10 个样,对其直径与矢高进行测量,分别计算其焦距、数值孔径与 f 数的值,其结果如表 3 所示,计算可知焦距的平均值为 $241.07 \mu\text{m}$,焦距的均匀性误差为:

$$\sigma_f = \frac{f_{\max} - f_{\min}}{f} \times 100\% = 1.7\%. \quad (7)$$

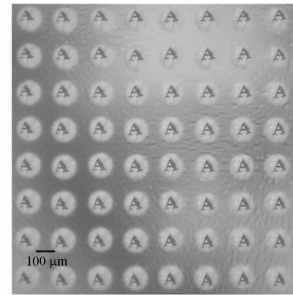
4.4 微透镜阵列的成列像质量测试

为了验证聚合物微透镜阵列的成像质量,进行了微透镜阵列成像测试实验,实验原理如图 12(a)所示,在白光源前面放置一张带有字母“A”的白纸,然后将微透镜阵列放置于中间,调节透镜和数码显微镜的位置可以成不同的像。如图 12(b)所示,将字母“A”倒置可以清晰的看到所成的实像。从图中可以观察到微透镜阵列的成像清晰、聚光性能良好。



(a) 微透镜阵列成像原理图

(a) Imaging schematic diagram of micro-lens array



(b) 数码显微镜观测到的成像图

(b) Imaging diagrams in digital microscope

图 12 微透镜阵列成像图

Fig. 12 Imaging diagrams of micro-lens array

5 结 论

基于微流体数字化技术搭建了聚合物微透镜阵列按需喷射制备实验系统,将 UV 固化胶(黏度值为 $50 \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$)按需喷射到镀有疏水化薄膜的玻璃基片上,再经过紫外光固化形成微透镜阵列。通过对玻璃基片的疏水化处理,微透镜的接触角得到了提高。精确制备了直径为 $25 \sim 1300 \mu\text{m}$ 、矢高为 $5.8 \sim 302.9 \mu\text{m}$ 、焦距为 $32.65 \sim 1697.75 \mu\text{m}$ 的微透镜。制备了 15×15 微透镜

阵列,其平均直径为 $140.29 \mu\text{m}$,平均矢高为 $32.94 \mu\text{m}$,直径变异系数 $C \cdot V$ 达 0.64% ,焦距均匀性误差为 1.7% 。采用白光干涉/轮廓仪(VSI模式,扫描区域为 $29.4 \mu\text{m} \times 39.3 \mu\text{m}$)测定了所制得微透镜的表面粗糙度及轮廓,测得表面粗糙度的轮廓算术平均偏差 R_a 为 247.99 nm ,均方根粗糙度 R_q 为 298.60 nm ,并具有平滑的轮廓曲线。

参考文献:

[1] VOELKEL R, DUPARRE J, WIPPERMANN J, *et al.*. Technology trends of microlens imprint lithography and wafer level cameras (WLC) [C]. *Proc. MOC08, Conf. On Micro-Optics, Brussels*, 2008.

[2] ODER T N, SHAKYA J, LIN J Y, *et al.*. Nitride microlens arrays for blue and ultraviolet wavelength applications [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2003, 82: 3692-3694.

[3] ONG N S, KOH Y H, FU Y Q. Microlens array produced using hot embossing process [J]. *Microelectron Eng.*, 2002, 60(3-4):365-379.

[4] 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.

[5] BARGHORN C, SOPPERA O, LOUGNOT D J. Fabrication of microlenses by direct photo-induced crosslinking polymerization [J]. *Applied Surface Science*, 2000, 168(1-4):89-91.

[6] HE M, YUAN X C, NGO N Q, *et al.*. Single-step fabrication of microlens array in sol-gel material by direct writing and its application in optical coupling [J]. *Opt. A: Pure App.*, 2004, 6:94-97.

[7] MACFARLANE D L, NARAYAN V, TATUM J A, *et al.*. Microjet fabrication of microlens arrays [C]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1994, 6(9): 1112-1114.

[8] VOIGT A, OSTRZINSKI U, PFEIFFER K, *et al.*. New inks for the direct drop-on-demand fabrication of polymer lenses [J]. *Microelectronic Engineering*, 2011, 88:2174-2179.

[9] 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*,

进行了微透镜阵列的成像实验,并得到微透镜阵列所成的清晰实像。结果表明,基于微流体数字化技术的聚合物微透镜按需喷射制备法具有制作过程简单、成本较低、液体微喷射精确以及微喷射材料适用性较好等特点;制备的微透镜阵列尺度范围大、尺寸一致性好、聚光性能良好、光强均匀、表面形貌均匀。

2012, 22:3053-3058.

[10] KIM J Y, MARTIN-OLMOS C, BAEK N S, *et al.*. Simple and easily controllable parabolic-shaped microlenses printed on polymeric mesas [J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2013, 1:2152-2157.

[11] XIE D, ZHANG H H, SHU X Y, *et al.*. Fabrication of polymer micro-lens array with pneumatically diaphragm-driven drop-on-demand inkjet technology [J]. *Optics Express*, 2012, 20(14): 15186-15195.

[12] 章维一,侯丽雅. 微流体数字化的可续与技术问题(I):概念、方法和效果[J]. *科技导报*, 2005, 23(8): 4-9.

ZHANG W Y, HOU L Y. Scientific and technological problems of digitalization of microfluids (Part I): concepts, methods and results [J]. *Science & Technology Review*, 2005, 23(8):4-9. (in Chinese)

[13] 章维一,侯丽雅. 微流体数字化的科学与技术问题(II):物质数字化及物质能量信息统一数字化概念研究 [J]. *科技导报*, 2006, 24(3):41-47.

ZHANG W Y, HOU L Y. Scientific and technological problems of digitalization of microfluids (Part II): Conceptual study of digitalization of matter-energy-information [J]. *Science & Technology Review*, 2006, 24(3): 41-47. (in Chinese).

[14] 耿鑫,侯丽雅,王洪成,等. 微流体数字化技术制备基因芯片微阵列[J]. *光学精密工程*, 2011, 19(6): 1344-1351.

GENG X, HOU L Y, WANG H CH, *et al.*. Preparation of genechip microarrays using microfluid digitalization [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(6):1344-1351. (in Chinese).

[15] 侯丽雅,王振琪,章维一,等. 金属微粉体脉冲输送的微特性实验[J]. *光学精密工程*, 2011, 19(5): 1030-1038.

- HOU L Y, WANG ZH Q, ZHANG W Y, *et al.*. Experiments of micro characteristics of pulse transfer for metallic powders [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(5):1030-1038. (in Chinese)
- [16] 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)
- [17] 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).
- [18] WANG H C, HOU L Y, ZHANG W Y. A drop-on-demand droplet generator for coating catalytic materials on microhotplates of micropellistor [J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2013, 183: 342-349.
- [19] 刘朝杨, 程璇. 透明超疏水疏油涂层的制备及性能[J]. *功能材料*, 2013, 6(44):870-873.
- LIU CH Y, CHENG X. Synthesis and properties of transparent superhydrophobic and oleophobic coatings [J]. *Journal of functional materials*, 2013, 6(44): 870-873. (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.

导师简介:



侯丽雅(1954—),女,江西余干人,博士,教授,博士生导师,1984年于北京航空航天大学获硕士学位,1995年于(日)法政大学获博士学位,主要从事微系统与纳米系统、微流体数字化技术、生物制造工程等方面的研究。E-mail: zhang weiyi_email@163.com

(版权所有 未经许可 不得转载)