

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, 南京 210094)

摘要: 采用以脉冲为微流动基本形态, 脉冲当地惯性力为主动力的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实验研究。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, 稳定微喷射出了粘度值为 50cps 的 UV 胶, 制得了最小直径达 25 μm 的微透镜。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 \times 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 Ra 为 247.99nm (扫描区域: 29.4 μm \times 39.3 μm), 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。从实验过程和结果可以看出, 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具有过程简单、成本低廉、工艺参数稳定等优点; 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: TQ433.4; TN25

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

Zhu Xiaoyang, HOU Li-ya, Zheng Yue, Wang Hongcheng, ZHANG Wei-yi
(School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094)

Abstract: Using the digitalization of microfluids technology with the pulse as the micro flow basic form and the pulsed local inertia force as the active force, the experimental research on the drop-on-demand (DOD) jetting fabrication of the micro-lens array was carried out. The DOD jetting fabrication system of micro-lens array was constructed. The UV-curable adhesive was DOD jetted on the glass substrate coated with the hydrophobic film, then an array of liquid plano convex micro-lens can be formed on the glass substrate due to surface tension and hydrophobic effect, and the micro-lens array can be obtained after the UV irradiation at room temperature. The influences of the parameters of system on the stable micro-jetting and the diameter of micro-lens were researched by experiments. Results showed that the UV-curable adhesive with the viscosity of 50cps was stability micro-jetted and the micro-lens with the diameter of 25 μm was obtained. A 15 \times 15 micro-lens array was obtained by experiments. Results showed that the coefficient of variation of the diameter is 0.64% and non-uniformity of the focal length is 1.7%. SEM pictures showed that the micro-lens has good surface morphology. The surface roughness of the micro-lens Ra is 247.69nm (scanning area: 29.4 μm \times 39.3 μm) by the white light interferometer (VSI mode) and the profile curves of the scanning area were smooth. Through the projection image experiment of the micro-lens, the clear real image of the micro-lens array was obtained. The experiment process and result indicate that using the digitalization of microfluids technology, the DOD jetting fabrication of the micro-lens array has many advantages such as the simple fabrication process, low cost, stable process parameters and the micro-lens has good geometry and optical performance.

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

基金项目: 教育部博士学科点专项科研基金项目(20113219110004); 国家自然科学基金资助项目(51175268, 11102090)

作者简介: 朱晓阳 (1988-), 男, 博士研究生, 研究方向: 微流体数字化技术, 微光学器件的制作

通信联系人: 侯丽雅 (1954-), 女, 教授, 博士生导师, 研究方向: 生物制造工程, 微流体数字化技术. E-mail: hou_liya@hotmail.com

0 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地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,聚合物微透镜因其较玻璃及半导体微透镜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特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]、灰度掩膜法^[4]、光诱导交联聚合法^[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,灰度掩膜法原理是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,多灰阶掩模的制作过程困难,费用昂贵,并且在曝光过程中图形转印难以控制,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,因其具有制作过程简单、灵活,制作成本低,工艺参数稳定且易于控制等特点而被广泛研究和应用。其既可制作单一透镜器件,同时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,但存在着微喷头不易拆卸、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,但存在着喷射不稳定、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],但存在着微喷射材料昂贵,喷射液体粘度较小(低于 30cps),难以喷射较高粘度液体等问题。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 固化胶制作了微透镜阵列,制作的微透镜阵列具有较好的几何与光学性能^[11],但存在着液滴可控性差,难以实现较小直径微透镜(通常大于 50 μm)的制备等问题。

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可制得微液滴阵列,再经过紫外光固化后,可制得微透镜阵列。

1 实验

1.1 实验材料

实验材料包括:光固化 UV 胶,其粘度值为 50cps (25 $^{\circ}\text{C}$, 旋转粘度计 NDJ-1、4#转子、

12rpm/min 条件下测得），其他性能指标如下表 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；SiO₂ 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 the UV-curable adhesive

外观	粘度 (cps)	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	800-1000	1.38	≥6H	2-6	0级

1.2 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。聚合物微透镜阵列按需喷射制备实验过程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

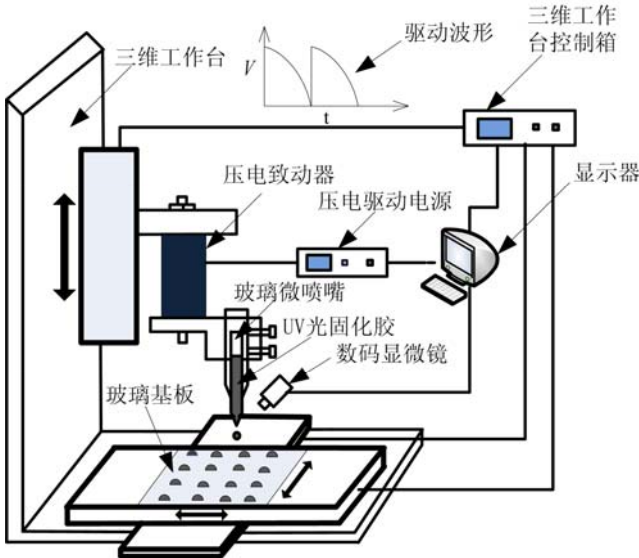


图 1 聚合物微透镜阵列按需喷射制备实验系统示意图

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

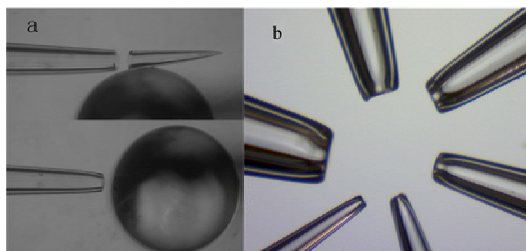
供给压电致动器的驱动电压波形、驱动电压幅值（V）和驱动频率（ f_0 ），其中驱动波形选择有利于液体喷射的陡升缓降波形^[17]，如图 1 所示。电压幅值可变范围为 0~80V，频率可变范围为 2~256Hz。微喷嘴内的液体在压电致动器的作用下将获得足够大的脉冲惯性力并克服粘性力从喷头处喷出。通过协调控制微流体脉冲驱动-控制参数与工作台运动参数，可以实现液体的定量、定位喷射，即按需喷射。

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 0.6mm，外径为 1.0mm）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。最终制得的微喷嘴为内构双锥形，如图 2（a）为微喷嘴的截取和锻制过程，图（b）为所制作的不同出口内径的内构双锥形微喷嘴。

1.3 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三步：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



(a) 微喷嘴的截取与锻制 (b) 不同出口内径的微喷嘴
(a) The cutting off and forging of the micro-nozzle (b) The micro-nozzles with different inner diameters

图 2、微喷嘴显微照片

Fig.2 Micrograph of the micro-nozzles

10 分钟，然后取出冷却 10 分钟，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 分钟，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
120 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 分钟，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。

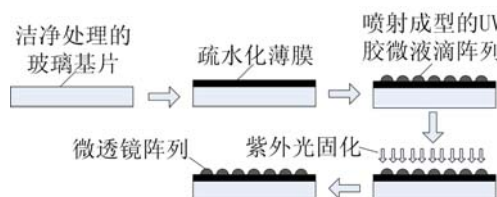


图 3 微透镜阵列制备过程

Fig.3 Fabrication process schematic diagrams of the polymer micro-lens array

微透镜形状与玻璃基片的清洁度、疏水化处理有密不可分的关系，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：一是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 $2\text{-}6\mu\text{m}$ ），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° ）。二是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。

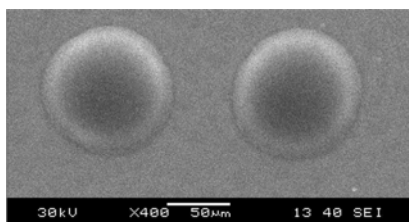


图 4 边缘缺陷的微透镜 SEM 图

Fig.4 SEM image of the micro-lens 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。为了制得多尺度的微透镜,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)),其中,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。

2 实验结果与分析

2.1 系统参量对稳定喷射的影响

本文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。从实验结果可以看出,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 $n_0=1$)。

为了获得稳定、均匀的微喷射量,本文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、均匀微喷射的参数范围为: V : 30~80V, f_0 : 2~20Hz, d : 5~110 μm 。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,

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 the driving voltage and the distance between the micro-nozzle and substrate with the satellite droplets

	喷头到基板距离 (S)			
	2mm	1.5mm	1mm	0.5mm
30V	Y	Y	N	N
40V	Y	Y	N	N
50V	Y	Y	N	N
60V	Y	N	N	Y
70V	Y	N	N	Y
80V	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)

时而液滴小)的现象。出现这个现象的原因可能是系统提供的惯性力大小与液体的粘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粘性力和表面张力而形成稳定喷射。

2.2 系统参量对微透镜直径的影响

本文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 。

2.2.1 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 : 10 μm -100 μm , f_0 : 2~20Hz, $n_0=1$; 图5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; 当驱动频率 f_0 越小时, d 对 D 影响越大, 反之则越小。当微喷嘴直径 d 越大时, f_0 对 D 影响越大, 反之则越小。当微喷嘴内径 d 为 10~100 μm , 驱动频

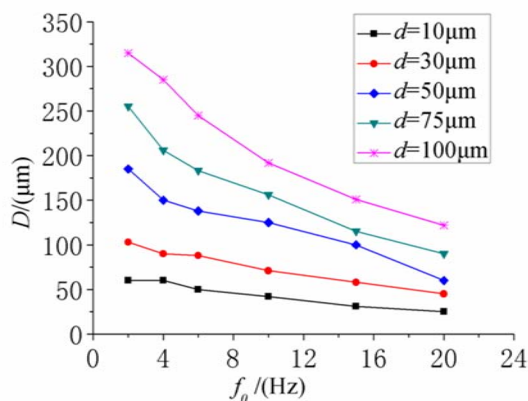


图 5、驱动频率与微喷嘴内径对微透镜直径的影响

Fig.5 Variation of the driving frequency and micro-nozzle inner diameter with the diameter of micro-lens

率 f_0 在 2~20Hz 之间变化时, 可制得 D 在 25~315 μm 之间的微透镜。图 7 (a) 为微喷嘴内径 d 为 10~100 μm 时制得的微透镜光学显微图 ($V=80\text{V}$, $f_0=2\text{Hz}$, $n_0=1$)。

2.2.2 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 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 为 1-50 变化时, 可以制得 D 为 100~1300 μm 的微透镜。图 7 (b) 为液滴数 n_0 为 1~50 时制得的微透镜光学显微图 ($V=30\text{V}$, $f_0=2\text{Hz}$, $d=100\mu\text{m}$)。

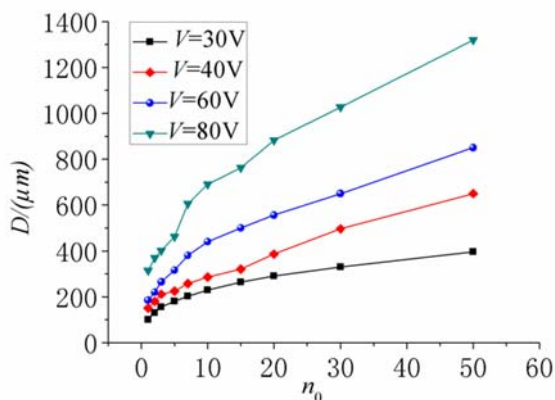
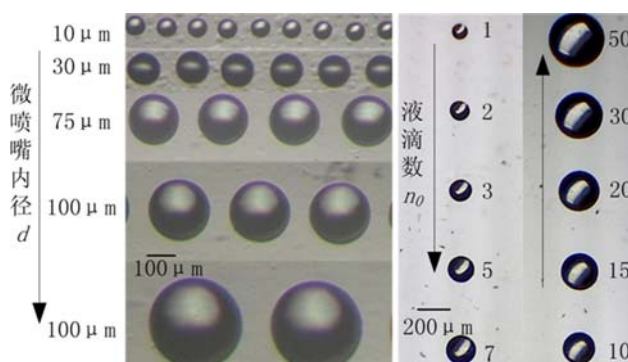


图 6、液滴数与电压幅值对微透镜直径的影响

Fig.6 Variation of the number of drops per micro-lens with the diameter of the 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) The micro-lens with different micro-nozzle inner diameters (b) The micro-lens with different numbers of drops per micro-lens

图 7 不同参数下制得的微透镜

Fig.7 The micro-lens with different fabrication parameters

3 微透镜阵列性能检测

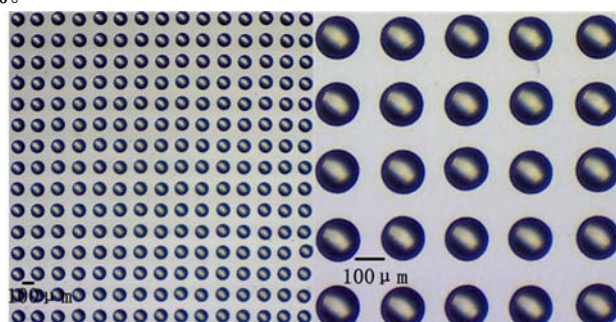
对于微透镜阵列，其检测方法与普通透镜有所不同，本文参照 ISO 组织提出的微透镜的检测方法，并结合已有的实验条件对微透镜进行了几何参数指标和光学性能指标两个方面的性能测试。

3.1 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，从图中随机挑选了 50 个微透镜进行了测量，结果显示为微透镜的平均直径为 $140.29\mu\text{m}$ ，平均矢高为 $32.94\mu\text{m}$ ，绘制了微透镜直径的一致性曲线如图 9 所示，并采用变异系数 $C\cdot V$ 来表征微透镜直径的一致性。其计算公式为：

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

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 the 15×15 micro-lens array

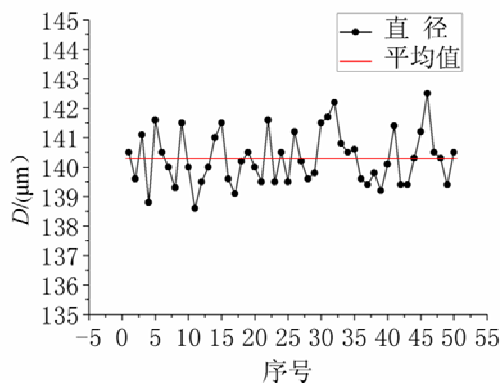


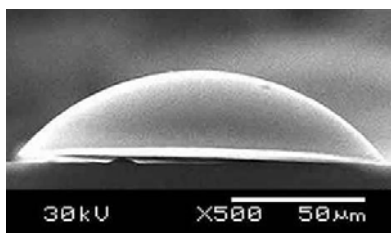
图9 一致性分析

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

3.2 微透镜的表面质量测试

215 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

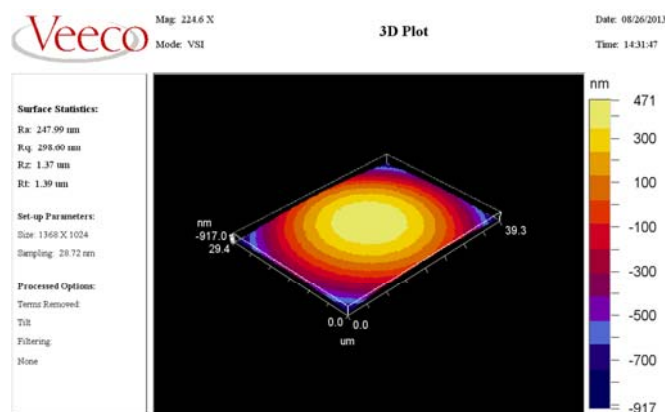


220 图 10 微透镜的 SEM 图(直径: 140.5μm, 矢高: 32.9μm)

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

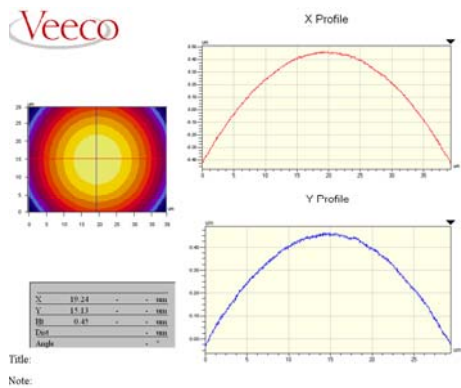
模式) 测定了所制得微透镜的表面粗糙度及轮廓, 扫描区域为 29.4μm×39.3μm。测得表面粗糙度的轮廓算术平均偏差 R_a 为 247.99nm, 均方根粗糙度 R_q 为 298.60nm, 如图 11 (a) 所示。由图 11 (b) 可以看出扫描区域具有较平滑的轮廓曲线。由此可见, 所制得的微透镜具有较好的表面光滑度。

225



(a) 微透镜的表面粗糙度

(a)The surface roughness of the micro-lens



(b) 微透镜表面轮廓曲线
(b) The profile lines of the micro-lens
图 11 微透镜表面粗糙度与轮廓

Fig.11 The Surface roughness and profile of the micro-lens

3.3 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，其关系可用下式 (1) 来表示，而曲率 R_c 与微透镜的直径和矢高有关，其关系如 (2) 式所示，其中 K

$$f = R_c / n - 1, \tag{1}$$

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， $K=-1$ 。由于所制得的微透镜为平凸型，故 $K=0$ 。

$$R_c = (K+1)h/2 + (D/2)^2/2h, \tag{2}$$

将 (2) 式代入 (1) 式即可得出焦距 f 的计算公式，如式 (3) 所示。

$$f = R_c / n - 1 = (D^2 + 4h^2)/8h(n-1), \tag{3}$$

数值孔径 (NA) 与透镜直径和焦距有关，其关系如式 (4) 所示。

$$NA = D / 2f, \tag{4}$$

数值孔径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，其关系如式 (5) 所示。

$$f_{\#} = f / D, \tag{5}$$

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

Table.3 Diameter, heights, focal Length, NA and f-number of 10 micro-lenses randomly chosen from micro-lens

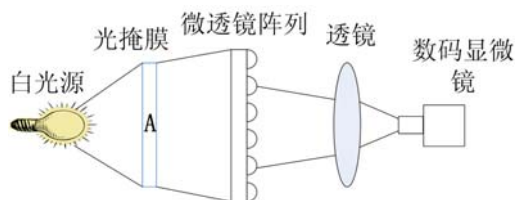
array					
序号	直径 (D)/μm	矢高 (h)/μm	焦距 (f)/μm	NA	f-数
1	140.5	32.9	240.66	0.29	1.71
2	139.5	32.5	239.723	0.29	1.72
3	141.2	33.1	241.69	0.29	1.71
4	140.2	32.6	241.23	0.29	1.72
5	139.6	31.7	243.94	0.29	1.75
6	139.8	32.5	240.58	0.29	1.72
7	141.5	33.5	240.68	0.29	1.70
8	141.7	33.4	241.70	0.29	1.71
9	142.2	33.9	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范围为 25.0~1300.2 μm , 矢高范围为 5.8~302.9 μm , 焦距范围为: 32.65~1697.75 μm 。从所制得 15 \times 15 微透镜阵列中随机取 10 个样, 对其直径与矢高进行测量, 并利用以上公式 (3)、(4)、(5) 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 μm , 焦距的均匀性误差为:

$$\sigma_f = \frac{f_{\max} - f_{\min}}{\bar{f}} \times 100\% = 1.7\%$$

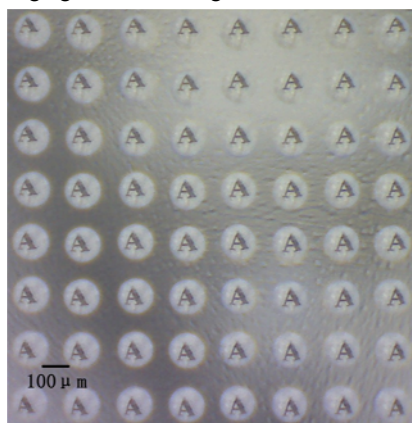
3.4 微透镜阵列的成列像质量测试

为了验证本文制备的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 the micro-lens array



(b) 数码显微镜观测到的成像图

(b) The imaging diagrams in the digital microscope

图 12 微透镜阵列成像图

Fig.12 Imaging diagrams of the micro-lens array

4 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 (粘度值为 50cps) 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。微透镜的直径随微喷嘴内径、系统驱动电压幅值与液滴数的增大而增大, 随系统驱动频率的增大而减小。通过实验, 精确制备出了直径范围为 25~1300 μm 、矢高范围为 5.8~302.9 μm 、焦距范围为 32.65~1697.75 μm 的微透镜。制备了 15 \times 15 微透镜阵列, 其平均直径为 140.29 μm , 平均矢高

为 32.94 μm , 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 247.99nm, 均方根粗糙度 R_q 为 298.60nm, 并具有平滑的轮廓曲线。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。以上结果表明, 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。

[参考文献] (References)

- [1] VOELKEL R, DUPARRE J, WIPPERMANN J, et al.. Technology trends of microlens imprint lithography and wafer level cameras (WLC) [C]. Proc. MOC'08, 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. Opt. 2004 Opt. 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, 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.
- [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.
- [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.
- [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.
- [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.
- [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和驱动效果的影响[J]. 光学精密工程, 2012, 20(10): 2251-2259.
- [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, 44(6): 870-873.