

文章编号 1004-924X(2012)06-1250-07

超声时效技术在微注塑模具制作中的应用

杜立群^{1,2*}, 李成斌², 李永辉², 于同敏¹

- (1. 大连理工大学 精密与特种加工教育部重点实验室, 辽宁 大连 116024;
2. 大连理工大学 辽宁省微纳米及系统重点实验室, 辽宁 大连 116024)

摘要:针对金属微注塑模具 UV-LIGA 制作过程中由于 SU-8 胶内应力过大而引起的胶膜破裂、变形甚至脱落等问题,提出将超声时效技术应用于微注塑模具的制作工艺。首先,利用紫外光刻工艺制备了电铸胶膜,在显影前使用自制的超声时效装置对胶膜进行超声处理。然后,采用无背板生长方法在 38CrNiMnMo 模具钢基底上直接进行镍金属的电铸生长,讨论并解决了工艺过程中遇到的 SU-8 胶浮胶变形、非圆形基片的匀胶、胶膜中的气泡以及微电铸层结合不牢等问题。最后,制作出微通道宽度和高度分别为 80 μm 和 35 μm 的微注塑模具。实验结果表明,超声时效技术的使用避免了由于 SU-8 胶内应力过大引起的破裂、变形甚至从基底脱落等缺陷,增强了 UV-LIGA 技术制作微注塑模具的能力,提高了制作微注塑模具的成功率。

关键词:超声时效技术;微注塑模具;UV-LIGA 工艺;SU-8 光刻胶;内应力

中图分类号: TN305; TB559 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20122006.1250

Application of ultrasonic stress relief technology to microinjection mold fabrication

DU Li-qun^{1,2*}, LI Cheng-bin², LI Yong-hui², YU Tong-min¹

- (1. Key Laboratory for Precision and Non-traditional Machining Technology of the Ministry of Education, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;
 2. Key Laboratory for Micro/Nano Technology and System of Liaoning Province, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)
- * Corresponding author, E-mail: duliquan@dlut.edu.cn

Abstract: In the UV-LIGA fabrication process of a microinjection metal mold, the large internal stress of a SU-8 layer can result in SU-8 mould defects such as micro cracks, distortion or even exfoliation. In order to avoid these defects, the ultrasonic stress relief technology was introduced into the microinjection process. First, the SU-8 mould was obtained by coating, soft baking, ultraviolet exposure and post-exposure baking, and it was treated by the ultrasonic stress relief equipment before developing. Then the backless plate growing method was adopted to directly fabricate the nickel micro-electroforming pattern on a 38CrNiMnMo mould steel substrate and the SU-8 layer defects emerged in the process such as the distortion and exfoliation in the SU-8 spin coating on a non-circular substrate, the

收稿日期: 2012-02-03; 修订日期: 2012-02-22.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 51075057, 50675025)

air bubbles in photoresist layer and the adhesion of plating layer with the substrate were eliminated or improved. Finally, the microinjection mold with a channel width of 80 μm and a height of 35 μm was fabricated. The results show that by using the ultrasonic stress relief technology, the SU-8 mould defects caused by large internal stress in SU-8 layer are overcome, the capacity of manufacturing microinjection mold via UV-LIGA technology is enhanced, and the success rate of microinjection mold fabrication is greatly improved.

Key words: ultrasonic stress relief technology; microinjection mold; UV-LIGA process; SU-8 photoresist; internal stress

1 引言

随着注塑成型生产微塑件技术的发展,注塑成型所需微注塑模具的加工引起了人们的广泛关注^[1]。目前,微注塑模具的加工方法主要有电火花线切割、激光烧蚀、LIGA及UV-LIGA等。

Naphon等^[2]使用电火花线切割方法加工出最小宽度为200 μm 的散热片微通道,但电极丝直径的进一步微型化已成为微模具电火花线切割加工的瓶颈,同时电极丝的圆形截面也限制了尖锐形状的加工。另外,加工时电极丝的振动会降低其加工精度和表面质量。激光烧蚀法由于使用诸如硅片等不导电的材料作为基底,因此必须要在上面沉积一层金属种子层才能进行电镀获得型腔结构,电镀完成后通过溶解种子层的方法将微注塑模具与基底分离,工艺过于繁琐^[3]。虽然LIGA技术^[4]可以采用金属作为基底,省去了种子层沉积及去除步骤,但其需要高能量的X射线源,这一昂贵的设施极大地限制了它的广泛应用。

作为LIGA的替代技术,UV-LIGA技术在光刻过程中用紫外光代替了昂贵的同步辐射光源,不需要制作复杂的X光掩模,而且缩短了加工周期,大大节约了加工成本。基于以上优点,UV-LIGA技术在微注塑模具的制作中已获得应用,且工艺技术逐渐成熟、规范^[5]。

庄俭等^[6]在微注塑模具的制作过程中,为减少SU-8胶曝光过程中因交联作用产生残余应力而引起胶层弯曲破裂的可能,曝光后将基底镶块置于65 $^{\circ}\text{C}$ 的烘箱中烘烤2 min,再将温度提高至95 $^{\circ}\text{C}$ 烘烤9 min,取得了较好的效果。但该方法去除内应力的效果有限,尤其当胶膜形状复杂时,将难以满足加工要求。

在本项目组先前的研究中^[7],提出了通过超

声处理减小SU-8胶内应力的方法,并通过实验研究了超声振动对SU-8胶内应力的影响。讨论了工作台振幅、输入功率和时效时间等重要参数对超声时效效果的影响,对比分析了超声时效前、后SU-8胶层中的内应力值。研究表明,选择合适的实验参数,超声时效技术可以有效地减小SU-8胶层中的内应力,SU-8胶层的应力消除率随着振幅和输入功率的增大而增加,随着时间的增长先增大后减小,最后趋于稳定,其最佳的超声时效时间为10 min。当时效时间超过15 min时,超声时效的效果就不再明显。

本文在微注塑模具的制作中,利用超声时效技术克服了SU-8胶内应力大的缺点,解决了UV-LIGA工艺过程中遇到的气泡、浮胶、铸层结合不牢等问题,获得了实用化的微注塑模具结构。

2 SU-8胶超声时效技术

SU-8光刻胶良好的机械性能、近紫外光范围内较低的吸收率使其适合于制作高深宽比微结构的电铸芯膜^[8]。近年来,基于SU-8胶的UV-LIGA工艺在微结构制作中得到了应用^[9-10]。但在后烘冷却的过程中,交联的SU-8胶由于收缩受到基底的限制,胶层内出现较大的拉应力。SU-8胶层中内应力的存在,极大地限制了微结构的制作。这是因为内应力会导致胶膜的变形、裂纹等缺陷,特别是SU-8与基底结合力不好时,大的内应力会导致胶膜的扭曲变形甚至脱落^[11]。由于阳型胶膜与基底的接触面积小,在阳型胶膜的制作中,胶膜的扭曲变形甚至脱落的现象尤为突出,而且会随着胶层变厚而恶化。因此,内应力已成为SU-8胶结构稳定性和实现更高深宽比的瓶颈之一^[12]。

项目组前期的研究表明:超声时效技术是通

过改变交联网的特征来减小 SU-8 胶层中内应力的,这一过程主要体现在 3 个方面^[13-14]:

(1) 超声振动时产生的机械能和热能可消除 SU-8 胶中交联网的缺陷,从而降低胶层中的内应力。

(2) 超声能量以振动的形式作用在互穿或堆叠的交联网联合体上,使互穿的交联网发生松动,使堆叠的交联网分离,从而达到降低内应力的目的。

(3) 当超声能量足够时,就会造成交联网部分分子链的断裂,这在一定程度上会破坏交联网的结构,释放 SU-8 胶层中的内应力。

本文将超声时效技术应用在微注塑模具的制作中,收到了比较好的工艺效果。

3 微注塑模具制作

微注塑模具制作工艺如图 1 所示,在经过预处理的基片上经匀胶、前烘、曝光、后烘、显影等工艺过程得到胶膜,再利用该胶膜进行微电铸,电铸过程中须控制好温度、时间、铸液 pH 值、电流密度、占空比等参数,电铸后对模具进行真空退火,最后将金属结构和光刻胶进行分离,得到微注塑模具的立体结构。

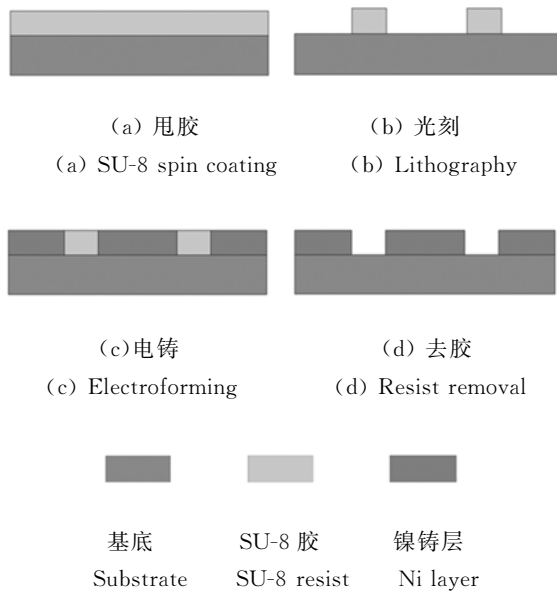


图 1 微注塑模具的制作流程

Fig. 1 Fabrication process of microinjection mold

上述工艺流程的具体步骤如下:

(1) 38CrNiMnMo 模具钢基片前处理。钢基

片(36 mm×16 mm×5.5 mm)的前处理依次为研磨、抛光、清洗及烘焙 4 个步骤。研磨和抛光均在 UNIPOL-1502 型精密研磨抛光机上完成,磨削时研磨盘带动砂纸旋转对基片表面进行磨削,去除表面的各种宏观缺陷、氧化皮及锈迹等,以提高金属基底表面的平整度。抛光是为了进一步去除基片表面的细微不平,降低表面粗糙度,提高表面的光洁度。抛光完毕后先用丙酮棉球将基片擦拭干净,之后使用 KQ-250DB 型数控超声波清洗器将基片依次在丙酮、无水乙醇中超声清洗各 20 min,最后用去离子水冲洗,氮气吹干,并置于 120 °C 的电热鼓风干燥箱中烘 1 h 以上。

(2) 甩 SU-8 胶。将适量 SU-8 2015 光刻胶滴在钢基片上,使用 KW-4A 型台式匀胶机旋转涂覆,转速为 800 r/min,时间为 18 s,使光刻胶均匀分布于基片表面,获得厚度约为 50 μm 的胶膜。之后将涂胶基片放在水平台上,自平整 30 min 以减小边珠效应,保证胶层的均匀、平整,为曝光做准备。

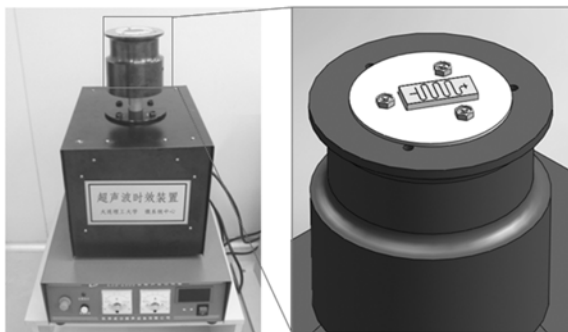
(3) 前烘。前烘可以去除溶剂,一方面增大光引发剂在光刻胶中的比例,另一方面使 SU-8 胶在一定程度上固化,从而解决粘板问题。通常将前烘分两步:先进行低温烘烤,然后逐步升高温度,这样可以有效地去除胶中的溶剂。本实验采用阶段性升温的方式,各温度和保温时间为:65 °C, 15~20 min; 70 °C, 15~20 min; 75 °C, 5~10 min; 80 °C, 5~10 min; 85 °C, 50~70 min。前烘完毕后关闭烘箱,使基片在烘箱内缓慢冷却至室温,避免温度骤变引入大应力并减少裂纹的产生。

(4) 曝光。在 BGJ-3 型紫外曝光机上采用接触式曝光的方法,使用 SU-8 胶敏感的 365 nm 波长紫外光曝光,曝光剂量为 200 mJ/cm²,曝光 10 min 以实现微图形的转移。曝光时间太短时,产生的酸催化剂的量不够,即使在适当的后烘条件下所有的酸催化剂都发生了反应,光刻胶的交联密度也不高。曝光时间太长时,图形线宽将小于掩模板图形,且随曝光时间的增加此偏差逐渐拉大。

(5) 后烘。将涂胶基片置于 85 °C 热板上后烘 2~4 min,冷却至室温。后烘的目的是使曝光后的胶层曝光区域发生更加完全的交联,以便显影后能得到高质量的微图形结构。

(6) 超声处理。研究表明^[15],SU-8 胶层中的

内应力主要产生于后烘冷却阶段,并且在显影之后释放,有时出现微观裂纹、扭曲,甚至是胶体脱落现象。因此,超声时效实验安排在后烘之后显影之前。超声实验设备为自制的超声时效装置如图2所示,该装置的详细介绍见文献[7、16]。超声处理前使用螺钉和PMMA夹具将涂胶基片固定到超声工作台上,如图2(b)所示,选用输入功率125 W、超声频率20 kHz对SU-8胶进行超声处理10 min以消除胶膜内应力。



(a) 整体图 (b) 基片装夹示意图
(a) Whole device (b) Fixing of the substrate

图2 超声时效装置

Fig. 2 Ultrasonic stress relief device

(7) 显影。显影的目的是显现出曝光后在光刻胶层中形成的潜在图形,对SU-8胶而言就是未曝光部分的胶膜被去除,曝光部分的胶膜得以留下,这样,基片上的胶膜形成了掩模的反图形。在DF-II型湿法腐蚀台上采用浸入式显影方法在SU-8显影液-PGMEA中显影6~8 min,显影过程中不断晃动基片以提高显影质量。为保护膜,显影后将胶膜浸入到去离子水中漂洗多次,最后用氮气吹干。

(8) 去残胶。将基片置于DQ-500型等离子去胶机中去除残胶。去胶机的真空度为140 Pa、去胶功率为40 W、去胶时间为10~15 min。

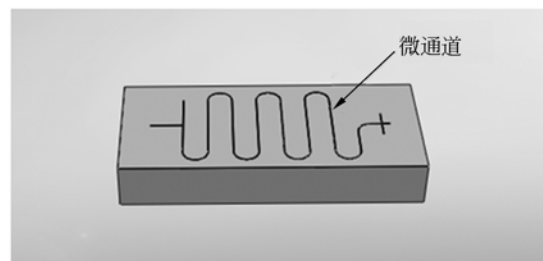
(9) 酸洗。为去除基片表面的氧化膜,促进铸层的良好生长以及保证铸层与基底的结合力,在电铸前使用酸洗液对电铸区域酸洗10~20 s,然后迅速用去离子水冲洗,并立即放入电铸液中进行电铸,以减少外界环境对基片表面的影响。

(10) 电铸。电铸是生成微注塑模具的关键环节,实验采用在基片上直接电铸生长的无背板生长工艺^[17]。使用DZY-3型双槽双路精密电铸

机进行脉冲电铸,电铸过程中采用阴极移动和循环过滤,电铸液的主要成分包括360~380 g/L的氨基磺酸镍,5~10 g/L的氯化镍和50~60 g/L的硼酸。微电铸工艺条件为pH值3.8~4.0;温度50~55℃;电流密度1.0~1.5 A/dm²;占空比2:10;电铸时间6 h。由于电铸过程中电场的边缘效应,铸层表面并不平整,铸层外边缘较中间厚,因此采用人工研磨的方法对电铸后的铸层表面进行研磨抛光,以获得平整的铸层表面。

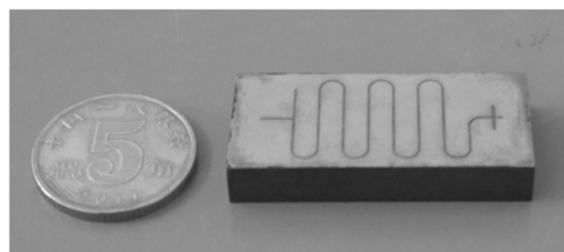
(11) 真空退火。真空退火可以消除铸层的残余应力、稳定尺寸、减小变形和裂纹倾向,还可以细化晶粒,调整组织,消除组织缺陷。实验使用ZZS-400型真空镀膜机对模具进行真空退火2 h,退火温度为350~400℃。

(12) 去胶。作为电铸胶膜的SU-8胶在结构制作完成后的去除是微注塑模具制作过程中的一个关键问题。考虑到孤岛状阳型图案胶膜使用常规方法较难去除,本文针对镍金属具有较好的耐酸能力,使用无机酸煮的方法去除SU-8胶膜^[18],得到微模具。图3为微注塑模具的三维示意图与实物图。



(a) 三维示意图

(a) Schematic of microinjection mold



(b) 实物图

(b) Photograph of microinjection mold

图3 微注塑模具

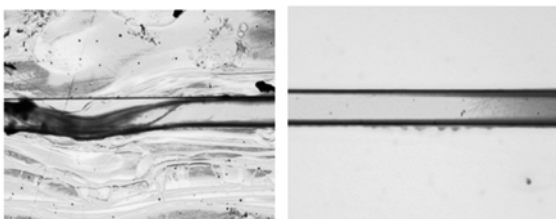
Fig. 3 Microinjection mold

4 问题与讨论

4.1 SU-8 胶浮胶变形问题

尽管 SU-8 胶具有很多优点,但它致命的缺点之一是在光刻过程中容易产生较大的内应力。如果内应力过大,容易导致浮胶,甚至破坏图形^[11]。由于制作微注塑模具的胶膜是孤岛状的阳型图案,胶膜线宽为 $80\ \mu\text{m}$,胶膜与基底接触面积小($9.5378\ \text{mm}^2$),内应力对 SU-8 胶膜与基底结合性的影响大,非常容易引起胶膜的变形甚至脱落。而且在显影及随后的冲洗过程中也极易造成胶膜的破坏,如图 4(a)所示。因此必须采取措施减小 SU-8 胶层的内应力,才能保证显影后胶膜的完好以提高微模具制作的成功率。

在随后的实验中,对曝光后显影前的 SU-8 胶膜进行超声处理,具体参数如下:输入功率 125 W,超声频率 20 kHz,超声时间 10 min。显影后胶膜质量完好,未发现胶膜的变形及脱落,如图 4(b)所示。由此可见,超声时效能有效地消除 SU-8 胶膜变形、脱落等缺陷,这对微注塑模具的成功制作尤为重要。



(a) 变形脱落胶膜 (b) 正常胶膜

(a) Distorted SU-8 layer (b) Fine photoresist pattern

图 4 SU-8 胶膜对比 $\times 200$

Fig. 4 Comparison of SU-8 mould $\times 200$

4.2 非圆形基片的匀胶问题

由于基片表面为长方形($36\ \text{mm}\times 16\ \text{mm}\times 5.5\ \text{mm}$),甩胶时长边和短边离心力分布有所差别,导致长边和短边处甩胶速度不同,进而产生了长边边缘部分区域没有光刻胶覆盖的现象,影响了后续实验的进行。

针对匀胶后 SU-8 胶难以铺满基片表面问题,采取的解决办法如下:

(1) 倒胶前充分烘热基片,提高 SU-8 胶的流动性;倒胶时尽量使 SU-8 胶铺满整个表面,倒胶

后倾斜基片使 SU-8 胶流动均匀分布。

(2) 甩完胶后采用较长的自平整时间以改善边珠效应。

4.3 胶膜中的气泡问题

SU-8 胶在光刻过程中经常会出现气泡问题,如图 5 所示。气泡的形成是因为倒胶时胶内存在空气,或 SU-8 胶与基底之间残留空气;另外,烘焙时大量溶剂从胶内挥发出来,也会造成气泡增多。

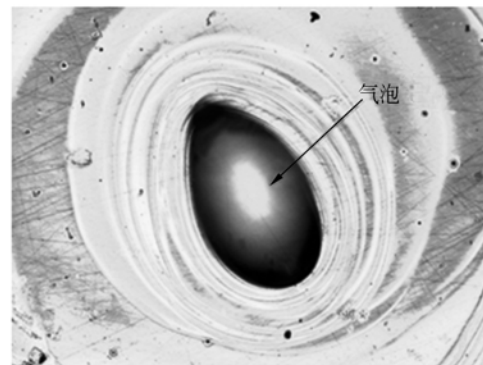


图 5 SU-8 胶中的气泡 $\times 500$

Fig. 5 Air bubbles in SU-8 layer $\times 500$

气泡会造成胶膜的不平整以及光刻后胶膜的不完整,为此采取解决方法如下。

(1) 倒胶前充分烘热基片,提高 SU-8 胶的流动性。

(2) 前烘采用阶段性升温的方式,各温度和保温时间分别为: $65\ ^\circ\text{C}$, $15\sim 20\ \text{min}$; $70\ ^\circ\text{C}$, $15\sim 20\ \text{min}$; $75\ ^\circ\text{C}$, $5\sim 10\ \text{min}$; $80\ ^\circ\text{C}$, $5\sim 10\ \text{min}$; $85\ ^\circ\text{C}$, $50\sim 70\ \text{min}$ 。之后,使基片缓慢冷却至室温。

4.4 铸层结合力问题

无背板生长工艺具有微电铸时间短、模具质量高等优点,但所得的铸层与基底结合力较差。本文采取了 3 种方法来解决这一问题。

(1) 等离子处理。等离子处理用来去除显影后残留在沟道中的 SU-8 胶残渣和其他杂质,为电铸做准备。等离子处理的真空度为 $140\ \text{Pa}$,功率为 $40\ \text{W}$,时间为 $10\sim 15\ \text{min}$ 。等离子处理的时间不能太短也不能太长,时间短了杂质去除不干净,时间太长产生的热量容易对胶膜造成损坏。

(2) 酸洗处理。酸洗处理用来去除基片表面的氧化膜。本文采用无机酸洗的方法,将带有 SU-8 胶图形的基片浸入酸洗液中 $10\sim 20\ \text{s}$ 。酸洗时间不能太短,否则达不到酸洗效果,时间太长

则容易对胶膜造成破坏。

(3) 小电流活化。采用小电流活化的预电铸方法,即在微电铸的开始阶段,先以小电流活化预铸,然后再以正常电流密度施铸。

5 结 论

本文将超声时效技术引入到微注塑模具UV-LIGA制作过程中,利用紫外光刻工艺制备了电铸胶膜,通过改善前烘参数,解决了胶膜制备过程中出现的气泡问题,通过后烘后显影前对50 μm 厚的SU-8胶进行超声处理,解决了SU-8胶内应力过大引起的胶膜破裂、变形甚至脱落等问题。然后,应用无背板生长工艺,在38CrNiMnMo模具钢基片上直接电铸生长出镍

模具型腔,通过等离子处理、酸洗和小电流活化方法解决了无背板生长工艺中铸层结合不牢的问题,获得了微通道宽度和高度分别为80 μm 和35 μm 微注塑模具结构。实验结果表明,超声处理显著提高了微注塑模具制作的成功率,它不仅可用于微型腔的制作,也可用于微结构或SU-8胶膜的制作。

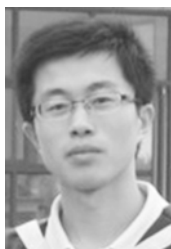
项目组先前已经通过实验研究了超声振动对SU-8胶内应力的影响,讨论并分析了不同超声时效参数对超声时效效果的影响。本文将超声时效技术应用到具体微结构的制作中,取得了较好的效果,但对更厚的光刻胶而言,内应力问题更加严重,这也是限制厚胶光刻的一个重要问题。因此,超声时效在厚胶光刻中的应用将是下一步的工作方向。

参考文献:

- [1] THIAN S, TANG Y, FUH J Y H, *et al.*. Formation of micromoulds via UV lithography of SU8 photoresist and nickel electrodeposition [C]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, UK: Mechanical Engineering Publications Ltd*, 2006:329-333.
- [2] NAPHON P, KHONSEUR O. Study on the convective heat transfer and pressure drop in the micro-channel heat sink [J]. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2009,3(1)6:39-44.
- [3] LORENZ H, DESPONT M, VETTIGER P, *et al.*. Fabrication of photoplastic high-aspect ratio microparts and micromolds using SU-8 UV resist [J]. *Microsystem Technologies*, 1998,4(3):143-146.
- [4] 陈少军,李以贵,杉山进. 应用X射线光刻的微针阵列及掩膜板补偿[J]. *光学精密工程*,2010,18(2):420-425.
CHEN SH J, LI Y G, SHAN SH J. Microneedle array and mask compensation based on X-ray lithography [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010,18(2):420-425. (in Chinese)
- [5] CHAN-PARK M B, ZHANG J, YAN Y H, *et al.*. Fabrication of large SU-8 mold with high aspect ratio microchannels by UV exposure dose reduction [J]. *Sensors and Actuators B*, 2004,101:175-182.
- [6] 庄俭,于同敏,王敏杰,等. UV-LIGA技术在微型模具型腔加工中的应用研究[J]. *哈尔滨工业大学学报*,2009,41(5):106-109.
ZHUANG J, YU T M, WANG M J, *et al.*. Fabrication of microchannel cavity using UV-LIGA process [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2009,41(5):106-109. (in Chinese)
- [7] DU L Q, WANG Q J, ZHANG X L. Reduction of internal stress in SU-8 photoresist layer by ultrasonic treatment [J]. *Science China Technological Sciences*, 2010, 53(11):3006-3113.
- [8] ZIZZARI A, ARIMA V, ZACHEO A, *et al.*. Fabrication of SU-8 microreactors for radiopharmaceutical production [J]. *Microelectronic Engineering*, 2011,88(8):1664-1667.
- [9] 胡洋洋,朱荻,李寒松,等. UV-LIGA制作超高微细阵列电极技术[J]. *光学精密工程*,2010,18(3):670-675.
HU Y Y, ZHU D, LI H S, *et al.*. Fabrication of ultra-high metal micro electrode array using UV-LIGA technology [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010,18(3):670-675. (in Chinese)
- [10] 黄新龙,熊瑛,陈光焱,等. UV-LIGA技术制作微型螺旋形加速度开关[J]. *光学精密工程*,2010,18(5):1152-1158.
HUANG X L, XIONG Y, CHEN G Y, *et al.*. Fabrication of micro spiral acceleration switch using UV-LIGA technology [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010,18(5):1152-1158. (in Chinese)
- [11] 杜立群,朱神渺. 微机电系统中SU-8厚光刻胶的内应力研究[J]. *光学精密工程*,2007,15(9):1377-1382.

- DU L Q, ZHU SH M. Study on internal stress of thick SU-8 layer in MEMS [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007,15(9):1377-1382. (in Chinese)
- [12] CHANG H K, KIM Y K. UV-LIGA process for high aspect ratio structure using stress barrier and C-shaped etch hole [J]. *Sensors and Actuators A*, 2000,84(3):342-350.
- [13] DU L Q, WANG Q J, ZHANG X L. Optimization of ultrasonic stress relief process parameters based on fuzzy neural network [J]. *Journal of Micro-Nano Mechatronics*, 2011,6:39-46.
- [14] 杜立群,王煜,王启佳,等. 聚合物 SU-8 光刻胶超声时效的实验研究[J]. *大连理工大学学报*, 2010,50(6):907-911.
- DU L Q, WANG Y, WANG Q J, *et al.*. Experimental study of ultrasonic stress relief used in SU-8 photoresist [J]. *Journal of Dalian University of Technology*, 2010,50(6):907-911. (in Chinese)
- [15] HAMMACHER J, FUELLE A, FLAEMIG J, *et al.*. Stress engineering and mechanical properties of SU-8 layers for mechanical application [J]. *Microsystem Technologies*, 2008,14:1515-1523.
- [16] DU L Q, WANG Q J. Experimental study on ultrasonic stress relief for cured SU-8 photoresist layer [J]. *Microelectronic Engineering*, 2010,87(12):2555-2560.
- [17] 杜立群,秦江,刘海军,等. 基于 UV-LIGA 技术的微注塑金属模具的工艺研究[J]. *微细加工技术*, 2006,(5):51-54.
- DU L Q, QIN J, LIU H J, *et al.*. Study on Process of Microinjection Metal Mold Based on UV-LIGA Technology [J]. *Microfabrication Technology*, 2006,(5):51-54. (in Chinese)
- [18] DU L Q, JIA SH F, NIE W R, *et al.*. Fabrication of fuze micro-electro-mechanical system safety device [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2011,24(5):836-841.

作者简介:



李成斌(1986—),男,山东日照人,硕士研究生,2010年于青岛科技大学获得学士学位,主要从事微加工工艺方面的研究。E-mail: licb_simon@163.com



李永辉(1986—),男,山东烟台人,硕士研究生,2009年于山东理工大学获得学士学位,主要从事微注塑成型模具制作方面的研究。E-mail: liyonghui654321@163.com



于同敏(1953—),男,辽宁大连人,大连理工大学教授。主要研究模具设计与制造、模具 CAD/CAM、模具 PDM、注塑成型技术。E-mail: yutmin530@sohu.com

导师简介:



杜立群(1966—),女,黑龙江望奎人,教授,博士生导师。1988年、1991年、1999年于东北大学分别获得学士、硕士和博士学位,主要研究方向为机电系统。E-mail: duliqun@dlut.edu.cn