

文章编号 1004-924X(2013)05-1228-06

# UV-LIGA 技术在制作细胞培养器 微注塑模具型腔中的应用

马雅丽<sup>1</sup>, 刘文开<sup>1\*</sup>, 刘冲<sup>2</sup>, 杜立群<sup>2</sup>

(1. 军事交通学院 军事物流系, 天津 300161;

2. 大连理工大学 机械工程学院, 辽宁 大连 116023)

**摘要:**研究了细胞培养器微注塑模具型腔的制作方法。针对微注塑模具型腔的结构特点,采用 UV-LIGA 套刻技术,分别通过两次 SU-8 胶光刻和 Ni 的微细电铸制作了以合金钢为基底的微结构;然后利用掩膜腐蚀方法在铸层上腐蚀出微排气通道。对 SU-8 厚胶工艺过程中的溶胀现象、匀胶不平整和去除困难等问题进行分析,提出在掩模板图形四周增设封闭的宽度为 20  $\mu\text{m}$  的隔离带来减少图形四周 SU-8 厚胶体积,改善了该处胶模的热溶胀变形,使铸层的尺寸误差由原来的 35  $\mu\text{m}$  降低到 10  $\mu\text{m}$ ,300  $\mu\text{m}$  高的微柱体侧壁陡直。隔离带的引入有效地提高了铸层图形的尺寸和形状精度。由于采用了刮胶的匀胶工艺和发烟硫酸去除 SU-8 胶的方法,消除了“边缘水珠效应”,彻底去除了 SU-8 胶。采用提出的方法可获得铸层质量好,与基底结合强度高的微注塑模具型腔。

**关键词:**细胞培养器;UV-LIGA 技术;SU-8 胶;微注塑模具型腔;微结构

**中图分类号:** TN305.7;Q-337 **文献标识码:** A **doi:**10.3788/OPE.20132105.1228

## Application of UV-LIGA technology to machining micro-injection mold cavity of cell culture device

MA Ya-li<sup>1</sup>, LIU Wen-kai<sup>1</sup>, LIU Chong<sup>2</sup>, DU Li-qun<sup>2</sup>

(1. Department of Military Logistics, Military Transportation University, Tianjin 300161, China;

2. School of Mechanical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116023, China)

\* Corresponding author, E-mail: lwk2003188@sohu.com

**Abstract:** A fabrication method of micro-injection mold cavity for a cell culture device was explored in this paper. Based on the structural characteristics of the micro-injection mold cavity and overlay UV-LIGA technology, a microstructure using appropriate alloy steel as the substrate was fabricated through SU-8 photoresist optical lithography and micro-electroforming technology respectively twice. Then, a micro exhaust duct was etched on an electroforming deposit through mask etching technology. Meanwhile, the swelling problem of SU-8 thick photoresist, poor surface evenness through spin-coating and SU-8 photoresist removal in the experiment process were analyzed, and a method of designing and fabricating a 20  $\mu\text{m}$  wide closed isolation strip around the mask graphics was presented to re-

收稿日期:2012-12-13;修订日期:2013-03-19.

基金项目:国家科技支撑计划资助项目(No. 2006BAF04B13)

duce the volume of SU-8 thick photoresist around the graphics and to improve the swelling deformation of plating mold. By which, the dimension error of the electroforming deposit is from  $35\ \mu\text{m}$  down to  $10\ \mu\text{m}$  and  $300\ \mu\text{m}$  high micro-square-cylinder side wall is steep. The introduction of closed isolation strip improves the dimensional and shape precisions of nickel electroforming deposit effectively and the uses of scraping photoresist and oleum techniques eliminates the edge bead effect and removes SU-8 photoresist completely. As a result, the micro-injection mold cavity with good quality and the high bonding strength between substrate and nickel electroforming deposit is obtained successfully.

**Key words:** cell culture device; UV-LIGA technology; SU-8 thick photoresist; micro-injection mold cavity; microstructure

## 1 引言

随着微机电系统(MEMS)的深入研究和快速发展,具有微小复杂结构的器件得到了广泛应用,例如打印机的微喷嘴<sup>[1]</sup>、微小细胞培养器<sup>[2]</sup>、微流控芯片<sup>[3]</sup>、THz无源器件<sup>[4]</sup>、微齿轮<sup>[5]</sup>、三维金属微结构<sup>[6]</sup>、微细阵列电极<sup>[7]</sup>等。微注塑成型是制造具有微细结构或重量在毫克以下塑件的加工方法之一。微注塑模腔的加工精度与质量直接影响微小塑件的成型质量。微型注塑模具作为微型塑件的成型工艺装备,其制造和发展水平对微型塑件的成型质量至关重要。紫外光电铸(UV-LIGA)工艺适用于制作具有一定厚度、高深宽比、复杂且图形精度高的微小器件,利用套刻或牺牲层UV-LIGA等工艺能制作台阶结构。因此研究UV-LIGA技术制作微注塑模具可以满足其尺寸及精度的要求。

在生物与基因工程研究领域,细胞培养器对组织工程学、干细胞应用等有着非常重要的作用。它可以为细胞培养建立三维的生长环境,同时在其培养过程中提供不同的生长条件等。Volker Piotter<sup>[2]</sup>等人利用PC或者PMMA材料制作细胞培养器芯片,其中细胞培养器支架是由LIGA技术制作的微注塑模具通过微注塑得到,芯片底部是高渗透性的PC隔膜,二者通过半自动定位焊接连接在一起。本文研究制作的细胞培养器微注塑模具型腔通过微注塑的方法将细胞培养器支架和培养基的输送通道同时注塑成型。这种配套的、集成的微注塑成型方法使微小元器件通过聚合物注塑封装成一体,可简化系统的制备过程,实现整体或部分的装配功能,解决了微机电系统的

装配难题,提高了器件的装配精度和系统的整体性能。

针对微注塑模具型腔的结构特点,利用UV-LIGA套刻技术和掩膜腐蚀的方法制作微型腔。重点对SU-8厚胶的溶胀机理进行了分析,并提出了在掩膜板图形四周增设封闭的隔离带,有效地提高了铸层的尺寸精度和形状精度。同时针对SU-8厚胶工艺过程中的匀胶不平整及其去除问题提出了解决方案。利用掩膜腐蚀的方法在铸层上腐蚀出了深度为 $10\sim 15\ \mu\text{m}$ 的微排气通道。

## 2 实验

### 2.1 实验材料与设备

实验使用了SU-8光刻胶(美国MicroChem公司),SU-8胶显影液(美国MicroChem公司),合金钢板(尺寸为: $55\ \text{mm}\times 55\ \text{mm}\times 10\ \text{mm}$ ),氨基磺酸镍电铸液(电铸液成分为 $550\ \text{g/L}$ 的氨基磺酸镍、氯化镍 $10\ \text{g/L}$ 、硼酸 $35\ \text{g/L}$ 以及 $0.1\sim 0.15\ \text{g/L}$ 的润湿剂),SUSS甩胶机,超声波清洗器,热板,烘箱,BGJ-3型曝光机,DZY-3型双路精度电铸仪,台阶仪及扫描电镜。

### 2.2 实验方案

细胞培养器的微注塑模具型腔由微阵列结构、微注塑浇口和微排气通道三部分构成。针对微型腔的台阶结构特点,利用UV-LIGA套刻技术分别进行2次SU-8胶光刻和Ni的微细电铸制作出微阵列结构和微注塑浇口。另外,在微注塑过程中,熔体的注射速度比传统注塑成形高,抽真空可以加快熔体的流动,有利于其填充。利用掩膜腐蚀的方法制作微排气通道使真空管路与微型腔相通。

## 2.3 基底材料的选择

微型腔镶块作为电铸镍层的基底,要求基底材料与镍铸层有很好的结合力,以保证二者结合牢固。同时应具有一定的强度,以承受注射成型时的压力。对于制作金属微模具常用的金属镍材料,其机械性能如屈服强度、硬度、抗蚀性等不如其它合金,难以承受微注塑成形时的注射压力及锁模力。因此选择含镍的 5CrNiMo 合金钢为基底材料,其具有良好的韧性、强度和高耐磨性,与镍铸层的结合力也比普通模具钢强,能够满足实验模具的工作要求。

## 2.4 实验过程

微型腔的制作工艺流程如图 1 所示。首先在预处理的基板上制备第一层 SU-8 胶模,待 350  $\mu\text{m}$  左右的 SU-8 厚胶涂匀后,静置 2 h 使 SU-8 胶回流平整化;然后采用梯度升温的方法前烘,接着进行曝光,剂量为 630  $\text{mJ}/\text{cm}^2$ ,再进行后烘,待其冷却至室温后进行显影,胶模图形显影到基底且无残胶即可。接下来在氨基磺酸镍溶液中进行微电铸,工作温度为 50~55  $^{\circ}\text{C}$ ,铸液 pH 值为 3.5~4.5,电流密度为 0.5~2  $\text{A}/\text{dm}^2$ ,电铸时间约 60 h。接着制备第二层厚度为 50  $\mu\text{m}$  左右的微注塑浇口和微圆柱阵列。然后进行掩膜腐蚀,先光刻出微排气通道,配制 Ni 的腐蚀液,通过控制腐蚀液中各种无机酸的配比和腐蚀时间最终在微结构和排气孔之间得到深度为 10~15  $\mu\text{m}$  的微排气通道,满足微注塑时的工艺要求。最后去除 SU-8 胶,获得微注塑模具型腔。

## 3 问题与讨论

SU-8 胶对工艺参数非常敏感,而且一旦固化后很难去除。在合金钢基底上制作微型腔的 UV-LIGA 工艺过程中有很多问题,包括 SU-8 厚胶的溶胀现象、匀胶不平整问题及其去除等。

### 3.1 溶胀问题

以 SU-8 胶为母模时,由于显影时显影液和微电铸时电铸液的浸泡及电铸温度的影响,胶模产生溶胀和热膨胀变形导致图形尺寸变小、形状精度下降,进一步影响铸层的精度。

热溶胀性产生的原因是 SU-8 胶中的聚合高分子与电铸液溶剂分子之间存在化学势梯度。电铸时 SU-8 胶浸入电铸液中,二者分子之间的化学势差将会产生渗透压,导致电铸液中的小分子渗入高聚物内部,使其体积变大。在此溶胀过程中,一方面,小分子在渗透压的作用下渗入 SU-8 胶内部使其体积膨胀;另一方面,由于结构的膨胀导致交联网络向三维空间伸展,分子链的弹性收缩会产生张力。当这两种相反的作用达到平衡时,即达到溶胀饱和状态,此时胶模的尺寸将不再发生变化<sup>[8]</sup>。

实验中,第一层胶模图形即微正方形阵列,尺寸为 200  $\mu\text{m} \times 200 \mu\text{m}$ ,显影后微正方形棱边呈圆角,如图 2(a)所示。微电铸后铸层尺寸仅为 165  $\mu\text{m} \times 165 \mu\text{m}$  左右,且微正方形柱体侧壁不陡直,形状精度很差,如图 2(b)所示。为此,在设计掩膜版时除了对微正方形的每条棱边做出 5  $\mu\text{m}$  的线宽补偿<sup>[9]</sup>,同时还在微正方形图形四周增设封闭的宽度为 20  $\mu\text{m}$  的隔离带,图 2(c)为带有隔离带的微正方形 SU-8 胶模图形,棱边圆角明显改善。微电铸后铸层尺寸接近 200  $\mu\text{m} \times 200 \mu\text{m}$ ,图 2(d)所示为 300  $\mu\text{m}$  高的微正方形柱体侧壁陡直。隔离带的引入使铸层的尺寸误差由原来的 35  $\mu\text{m}$  降低到 10  $\mu\text{m}$ 。

因此,由图 2 和测量数据可知,掩模板增设隔离带后,铸层的尺寸精度和形状精度得到显著提高。这主要是由于封闭的隔离带减少了微正方形图形四周 SU-8 厚胶的体积,降低其对图形尺寸及形状精度的影响,改善了该处胶模的热溶胀变形。

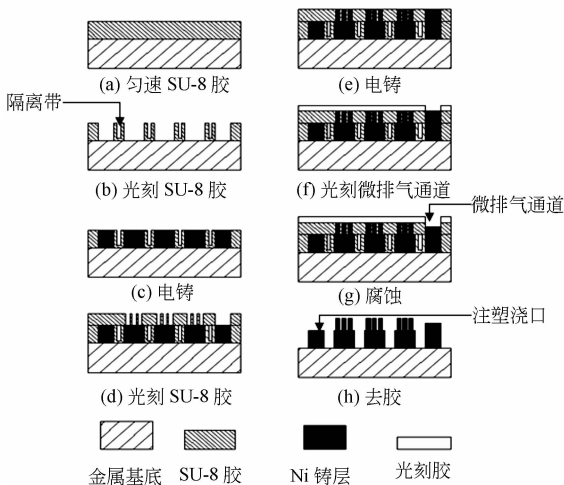
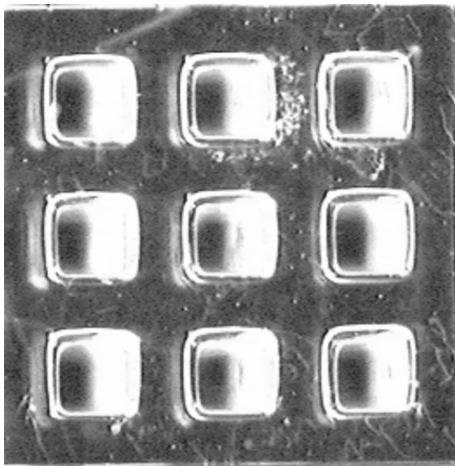
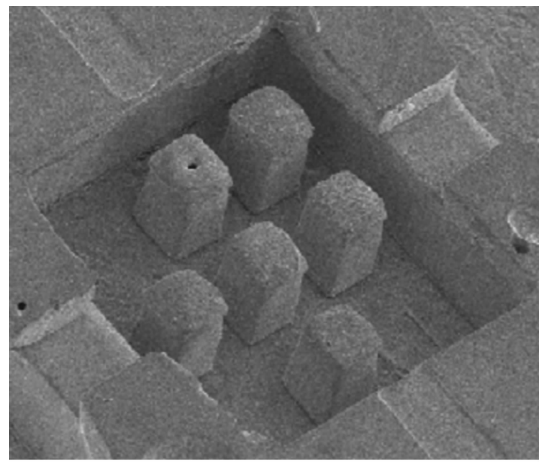


图 1 工艺流程图

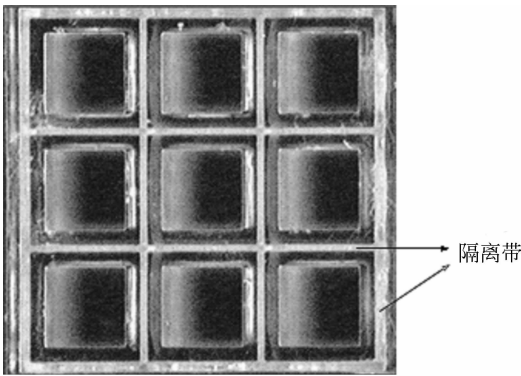
Fig. 1 Process chart



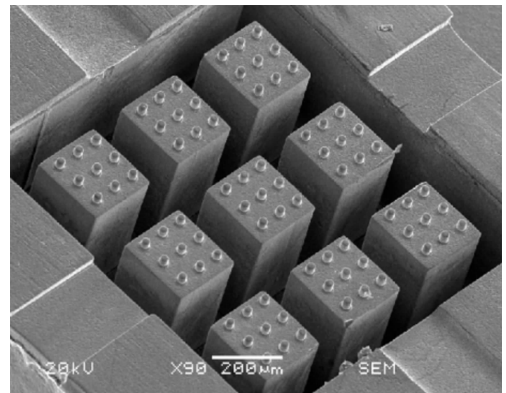
(a) 无隔离带胶模  
(a) Plating mold without isolation strip



(b) 无隔离带的铸层 SEM 照片  
(b) SEM photo of electroforming deposit without isolation strip



(c) 有隔离带胶模  
(c) Plating mold with isolation strip



(d) 有隔离带的铸层 SEM 照片  
(d) SEM photo of electroforming deposit with isolation strip

图 2 胶膜及铸层 SEM 照片

Fig. 2 Plating molds and SEM photos of electroforming deposit

### 3.2 匀胶问题

在甩第一层 SU-8 胶时,甩胶机低转速运行,由于 SU-8 胶的高黏度,很难得到表面平整的厚光刻胶层,并存在“边缘水珠效应”,即光刻胶层边缘比中间部分略厚。得到的  $350\ \mu\text{m}$  的 SU-8 胶厚度极不均匀,在曝光过程中掩模板与胶面存在间隙,由于存在菲涅尔衍射,使光刻的精度变差,影响胶模尺寸和侧壁垂直度,无法显影出精确的图形。实验中采用两种方法解决:一种是提高转速进行 2 次甩胶,2 次前烘达到所需的平面度高的胶厚;一种是采用刮胶的方法,手工刮胶使 SU-8 胶厚度均匀。前者前烘工艺复杂,而且浪费 SU-8 胶增加工艺步骤。而后者可方便、快速地获得均匀厚度的 SU-8 胶模,且胶模无边珠现象,可重复性强,均匀性好。

### 3.3 SU-8 胶去除问题

SU-8 胶作为微电铸的胶模,其去除是一个难点。目前使用较多的化学溶剂是 MicroChem 公司生产的基于 NMP(甲基吡咯烷酮)的去胶剂 PG,它只是溶胀部分交联的 SU-8 聚合物为凝胶状,并使其与基底间产生分离翘起而被剥离,超声或加热可加快去胶速度,但不能去除硬烘全交联的胶<sup>[10]</sup>,而且对高深宽比封闭狭槽、空洞中的小面积胶膜去除较困难。同时 SU-8 胶的溶胀会使胶模尺寸及形状发生变化,对于含有高深宽比微结构铸层的胶模,这种去胶方式往往会对微结构造成破坏,使其产生变形,严重时会使微结构从基底脱落。实验中,微型腔胶模图形为微小封闭沟槽,且胶厚为  $350\ \mu\text{m}$ ,利用去胶液很难去除。考虑到金属 Ni 有强的耐酸碱性能,利用发烟硫酸来煮电铸金属的 SU-

8 胶模<sup>[10]</sup>。在发烟硫酸的刻蚀作用下,交联的 SU-8 胶模表面被腐蚀成粘稠状的小碎片,然后用去离子水清洗。视胶厚不同,以上刻蚀、清洗过程可重复几次进行。

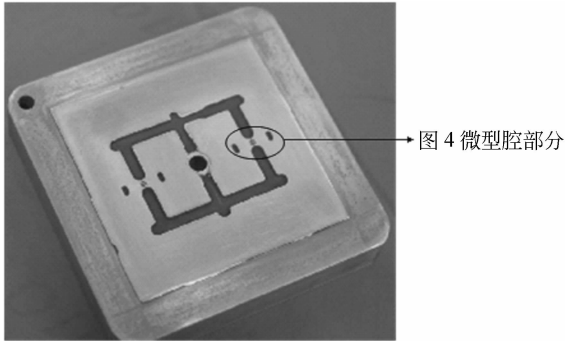


图 3 微注塑模具镶块的整体照片

Fig. 3 Global photo of micro injection mold

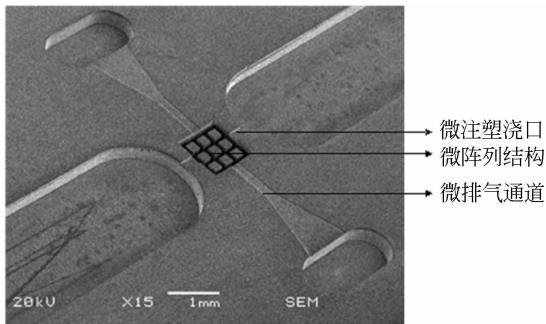


图 4 微型腔的 SEM 照片

Fig. 4 SEM photo of micro cavity

采用发烟硫酸煮片这种经济有效的去胶方法,获得了良好的效果。图 3 为微型腔镶块的整体照片。图 4 为去胶后的微型腔的 SEM 照片,微型腔的形貌保持的很好,未被酸毁坏,且胶去除的干净彻底。

另外,实验中 2 次电铸前,分别对基底和第一次电铸层进行酸洗,去除表面氧化膜,可有效提高铸层与基底、铸层之间的结合力。

## 4 结 论

UV-LIGA 工艺在 MEMS 领域的微器件制作中获得了广泛的应用,本文将 UV-LIGA 工艺应用到细胞培养器微注塑模具型腔的加工中,研究了制作微注塑模具型腔的 UV-LIGA 工艺和掩膜腐蚀微排气通道的方法及其合理的工艺参数匹配,解决了制作过程中遇到的一些工艺问题。试验中针对 SU-8 厚胶工艺过程中的溶胀现象,在掩模板图形四周增设封闭的宽度为  $20\ \mu\text{m}$  的隔离带,使铸层的尺寸误差由原来的  $35\ \mu\text{m}$  降低到  $10\ \mu\text{m}$ ,  $300\ \mu\text{m}$  高的微柱体侧壁陡直,隔离带的引入有效地提高了铸层图形的尺寸和形状精度。结果表明,选用合适的钢基底表面可直接通过微电铸获得图形精度高的微模具型腔,既简化了工艺过程,同时铸层与基底的结合力满足批量生产对微注塑模具型腔的性能要求。此研究为 UV-LIGA 工艺在微注塑模具制造中的应用提供了有效的方法。

## 参考文献:

- [1] SHEN S C, PAN C T, WANG Y R, *et al.*. Fabrication of integrated nozzle plates for inkjet print head using microinjection process [J]. *Sensors and Actuators A*, 2006, 127, 241-247.
- [2] VOLKER P, ERIC G, STEFAN G, *et al.*. Micro-injection moulding for the manufacturing of medical devices [J]. *Medical Device Manufacturing & Technology*, 2006, 25-27.
- [3] 徐征,王继章,杨锋,等. 辅助溶剂对 PMMA 微流控芯片模内键合的影响[J]. *光学 精密工程*, 2012, 20(2): 321-328.  
XU ZH, WANG J ZH, YANG D, *et al.*. Effect of assistant solvent on in-mold bonding of PMMA microfluidic chips [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(2): 321-328. (in Chinese)
- [4] 赵兴海,鲍景富,杜亦佳,等. MEMS 技术在 THz 无源器件中的应用[J]. *传感器与微系统*, 2011, 30(7): 5-9.  
ZHAO X H, BAO J F, DU Y J, *et al.*. Application of MEMS technology in passive THz-device [J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2011, 30(7): 5-9. (in Chinese)
- [5] 代俊,石庚辰. 基于 LIGA 工艺的微齿轮误差特点[J]. *探测与控制学报*, 2010, 32(4): 59-64.  
DAI J, SHI G CH. Study on micro-gears' error of LIGA processing [J]. *Journal of Detection & Control*, 2010, 32(4): 59-64. (in Chinese)
- [6] 杜立群,莫顺培,张余升,等. UV-LIGA 和微细电

火花加工技术组合制作三维金属微结构[J]. 光学精密工程,2010,18(2):363-368.

DU L Q, MO SH P, ZHANG Y SH, *et al.*. Fabrication of 3D metal microstructure based on UV-LIGA and micro-EDM technology [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010,18(2):363-368. (in Chinese)

[7] 胡洋洋,朱荻,李寒松,等. UV-LIGA与微细电火花加工组合制造微细电解阵列电极[J]. 东南大学学报(自然科学版),2010,40(1):106-110.

HU Y Y, ZHU D, LI H S, *et al.*. Fabrication of micro-ECM electrode array by combining UV-LIGA with micro electro-discharge machining [J]. *Journal of Southeast University (Natural Science Edition)*, 2010,40(1):106-110. (in Chinese)

[8] RUZZU A, MATTHIS B. Swelling of PMMA-

structures in aqueous solutions and room temperature Ni-electroforming [J]. *Microsystem Technologies*,2002,8,116-119.

[9] 杜立群,朱神渺,喻立川,等. 后烘温度对SU-8光刻胶热溶胀性及内应力的影响[J]. 光学精密工程,2008,16(3):500-504.

DU L Q, ZHU SH M, YU L CH, *et al.*. Effect of post exposure bake temperature on thermal swelling of SU-8 photoresist [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008,16(3):500-504. (in Chinese)

[10] 崔峰,靖向萌,赵小林,等. SU-8胶模去除技术[J]. 微细加工技术,2007,(1):1-6.

CUI F, JING X M, ZHAO X L, *et al.*. Techniques for remove of SU-8 photoresist mold [J]. *Microfabrication Technology*,2007,(1):1-6. (in Chinese)

#### 作者简介:



马雅丽(1983—),女,河北沧州人,助教,2009年于大连理工大学获得硕士学位,主要从事微机电系统方面的研究。E-mail: mayali928829@163.com



刘文开(1980—),男,河北唐山人,硕士,讲师,2008年于河北工业大学获得硕士学位,主要从事机械加工工艺设计方面的研究。E-mail: lwk2003188@sohu.com



刘冲(1963—),男,四川成都人,博士,教授,博士生导师,1989年于华中科技大学获得硕士学位,1993年于华南理工大学获得博士学位,主要从事微机电系统、精密仪器及测试技术等方面的研究。E-mail: chongl@dlut.edu.cn



杜立群(1966—),女,黑龙江望奎人,博士,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、博士学位,2002年于日本名古屋大学获得博士后,主要从事微机电系统方面的研究。E-mail: duliqun@dlut.edu.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)