

文章编号 1004-924X(2011)12-2935-06

## 集成铜金属压阻层的 SU-8 胶 悬臂梁微力传感器的制作

褚金奎\*, 陈兆鹏, 张 然

(大连理工大学 机械工程学院, 辽宁 大连 116024)

**摘要:** 由于 SU-8 胶的弹性模量比硅的低, 在 SU-8 胶悬臂梁上集成金属压阻可获得很高的力灵敏度系数, 因此本文基于 SU-8 胶设计并制作了一种集成蛇形结构铜金属压阻层的 SU-8 胶悬臂梁微力传感器。介绍了制作微力传感器的新型工艺, 并进行了传感器性能测试。实验结果表明: 设计的 SU-8 胶微力传感器在  $0\sim 350\ \mu\text{N}$  具有较好的线性度, 力灵敏度为  $0.24\ \text{mV}/\mu\text{N}$ , 测量误差为  $4.06\%$ 。该微力传感器可以满足对微小力的测量, 相对于硅材料的微力传感器, 其制作工艺更加简单, 周期更短。由于 SU-8 胶的生物兼容性好, 该传感器在生物医学研究领域有着很好的应用前景。

**关键词:** SU-8 胶; 金属压阻; 微力传感器; 悬臂梁

**中图分类号:** TP212.12 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20111912.2935

## Microfabrication of SU-8 cantilever micro-force sensor integrated by copper piezoresistance

CHU Jin-kui\*, CHEN Zhao-peng, ZHANG Ran

(School of Mechanical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

\* Corresponding author, E-mail: chujk@dlut.edu.cn

**Abstract:** As the SU-8 cantilever integrated by a metal piezoresistance can achieve a very high force sensitive coefficient due to its low elastic modulus, this paper designs a new type of SU-8 cantilever micro-force sensor integrated by a serpent-shaped copper piezoresistive structure and fabricates a prototype with a double-layer cantilever by a novel processing method. It introduces the design principles and fabrication method for the micro-force sensors and measures its technological parameters. Experimental results show that the SU-8 micro-force sensor has good linearity range in  $0\sim 350\ \mu\text{N}$  and its force sensitivity is  $0.24\ \text{mV}/\mu\text{N}$  and measuring error is  $4.06\%$ . It can implement the micro-force detection and has advantages of simpler production process and shorter cycle as compared with a silicon micro-force sensor. Moreover, the force sensor has potential application in biomedical research for the SU-8 with prominent biological compatibility.

**Key words:** SU-8; metal piezoresistance; micro-force sensor; cantilever

收稿日期: 2011-05-23; 修订日期: 2011-06-21.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 51175056); 国家 973 重点基础研究发展计划资助项目(No. 2011CB302101)

## 1 引言

微力传感器是微机电系统(Micro Electro Mechanical System, MEMS)中一种重要的微传感器件,在微机械、微生物等领域中有着重要的作用。其尺寸一般在微米量级,需要探知的信号也在微牛至毫牛量级,所以设计制作出一款具有较高力灵敏度、性能稳定且生物兼容性良好的微力传感器有着广泛的应用前景。

MEMS 传感器的加工技术主要沿用半导体制造工艺,基底材料一般为硅、聚合物等。敏感器件是 MEMS 传感器的核心部分,工作时需要直接或间接的与被测物接触,这就导致它的设计制作比传统电子器件的设计制作更为复杂。目前,基于 MEMS 工艺设计制作的微力传感器按工作原理划分,主要有电容式、压电式、压阻式等。压阻式微力传感器主要是利用硅掺杂工艺来完成,T. Chu Duc 等人利用半导体硅掺杂工艺制作出了一款可以测量两个方向力的微力传感器<sup>[1]</sup>,但硅中各种元素的掺杂浓度不容易控制,而且制作周期比较长,成本较高。

近年来,SU-8 胶在 MEMS 中的应用越来越广泛。SU-8 具有很强的耐化学腐蚀性,很适合作为元器件的基底材料,而且其生物兼容性非常突出<sup>[2]</sup>。SU-8 胶的弹性模量相对硅来说要低的多,亦能加工成高深宽比的结构<sup>[3]</sup>,黄新龙等人利用 SU-8 胶制作出了高深宽比的电铸工艺模具<sup>[4]</sup>。基于 SU-8 胶制作的悬臂梁及探针也已经成功应用在扫描力显微镜(Scanning Force Microscope, SFM)当中<sup>[5]</sup>。J. Thaysen 等人成功制作了第一款 SU-8 胶材料的压阻式力敏传感器<sup>[6]</sup>。M. Calleja 等人基于 SU-8 胶制作了一种集成微力传感器的微流体测量系统,且其无需任何装配<sup>[7]</sup>。Joseph C. Doll 等人利用 SU-8 胶制作了一款柱状微力传感器,用来测量秀丽隐杆线虫游动时产生的力<sup>[8]</sup>。

目前,用来制作 SU-8 胶材料微力传感器的方法大致可以分为剥离与刻蚀,而刻蚀工艺又可以大致分为离子束刻蚀、干法刻蚀、湿法腐蚀。剥离工艺一般需要的时间较长,而离子束刻蚀与干

法刻蚀所需的设备昂贵且工艺复杂。本文采用一种新颖的加工工艺,以金属铜作为压阻材料,基于湿法腐蚀工艺制作出了蛇形压阻结构,不仅加工时间短、费用较低,而且加工完成的传感器具有较好性能及通用性,可以根据不同需要进行工艺改进。

## 2 微力传感器的设计与制作工艺

### 2.1 设计原理

SU-8 胶微力传感器的工作原理为电阻应变计的应变效应,即导体或半导体材料在外界力的作用下产生机械变形时,其电阻值随之发生变化。当力作用于 SU-8 胶的悬臂梁时,附着在悬臂梁上的金属由于分子间的相互作用力会产生与 SU-8 胶基本相同的形变,因此悬臂梁应变的大小就可以从金属电阻变化的大小得知。当电阻受到外力作用时,电阻的相对变化量为:

$$\frac{dR}{R} = \frac{dl}{l} - \frac{dA}{A} + \frac{d\rho}{\rho}, \quad (1)$$

式中  $l$  为初始长度,  $A$  为横截面积,  $\rho$  为电阻率。

$$\frac{dR}{R} = (1+2\mu)\epsilon + \frac{d\rho}{\rho}, \quad (2)$$

$\mu$  为泊松比,  $\epsilon$  为轴向线应变。通常把单位应变引起的电阻相对变化量记为电阻应变系数,即

$$K = \frac{dR}{R} = (1+2\mu) + \frac{d\rho}{\rho}, \quad (3)$$

对于金属材料来说,  $K$  主要是由第一部分  $1+2\mu$ , 即电阻的尺寸变化决定的;对于半导体材料来说,

$K$  主要是由第二部分  $\frac{d\rho}{\rho}$ , 即电阻率的变化决定的。文献[9]中指出

$$\Delta R/R \propto K/E, \quad (4)$$

$E$  为弹性模量。

表 1 材料特性参数

Tab. 1 Material property parameter

	SU-8	Cu	Si
弹性模量 $E/\text{Pa}$	$2.1 \times 10^9$ <sup>[10]</sup>		$1.8 \times 10^{11}$
泊松比 $\mu$		0.326	
电阻应变系数 $K$		1.652	$140$ <sup>[6]</sup>

由文献[11],表 1 中参数可知,

$$(K/E)_{Cu/SU-8} = 0.787 \text{ GPa}^{-1},$$

$(K/E)_{Si} = 0.778 \text{ GPa}^{-1}$ , 从而得出 SU-8 胶微力传感器与硅材料微力传感器在结构尺寸以及产生应变相同时, SU-8 胶微力传感器可以达到硅微力传感器的性能。图 1 为测量时其惠斯顿 (Whitstone) 电桥电路。

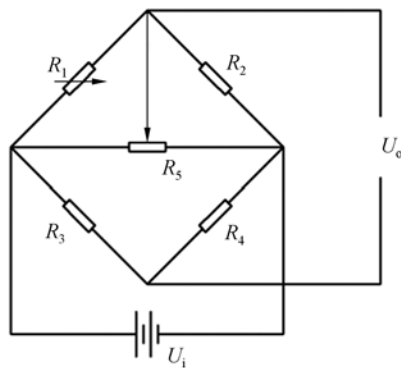


图 1 惠斯顿电桥电路

Fig. 1 Electric bridge of Whitstone

$R_1, R_2$  为 MEMS 工艺制作的金属电阻。其中  $R_1$  为测量电阻,  $R_2$  为参考电阻, 工作时  $R_2$  提供温度补偿作用, 减小温度变化对测量电阻的影响。由于在制作过程中,  $R_1, R_2$  电阻阻值不可能完全相同, 因此在电路中并联一个可调电阻  $R_5$ , 用于测量过程中调零, 然后通过精密电阻  $R_3, R_4$  共同组成一个惠斯顿电桥, 将电阻的变化量转换为电压的变化量, 通过低噪声的三级放大滤波电路来进行后续处理。

### 2.2 结构与制作工艺

微力传感器的整体结构采用 SU-8 光刻胶制作, 压阻和电极选用金属铜, 传感器的主体部分设计为悬臂梁结构。为了缩短释放时间, 在 SU-8 上留有便于释放的窗口。压阻部分设计成为蛇形结构, 能在较小的结构尺寸下得到较大的阻值。压阻和电极的连接部分采用圆弧状过度, 能有效地避免制作过程中断裂情况的发生。图 2 为 SU-8 胶微力传感器结构示意图。

SU-8 胶悬臂梁的长、宽、厚尺寸分别为 2.5 mm, 1.5 mm, 25  $\mu\text{m}$ 。压阻的单根长度为 2 mm, 总长度为 24 mm, 宽度为 0.045 mm, 厚度为 200 nm。铜的电阻率为  $1.72 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$ , 理论计算出的压阻阻值为 46  $\Omega$ 。

图 3 为 SU-8 胶微力传感器制作流程图。基

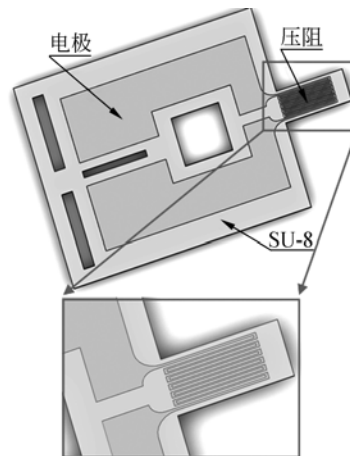


图 2 SU-8 胶微力传感器结构示意图

Fig. 2 Schematic drawings of SU-8 micro-force sensor

底为单晶或多晶硅片, 对其进行清洗、单面氧化之后, 在其表面生成一层二氧化硅层, 使用 SUSS Delta 80 甩胶机在氧化层上旋涂一层 Omnicoat 胶 (由 Microchem Corp., USA 生产的增强 SU-8 胶与基底结合力并能够被快速腐蚀掉的聚合物), 见图 3(a); 然后, 在 Omnicoat 胶上旋涂一层 25  $\mu\text{m}$  厚的 SU-8 2015 胶 (Microchem Corp., USA), 使用 SUSS MA-6 曝光机对其进行紫外曝光, 显影后得到传感器的悬臂梁结构, 见图 3(b); 在显影后的 SU-8 胶上先溅射一层 200 nm 厚的金属铜, 然后再旋涂一层 2  $\mu\text{m}$  的正胶 BP212, 见图 3(c); 利用紫外曝光方式对正胶 BP212 进行曝光, 显影后得到正胶结构层, 采用  $\text{HNO}_3$  溶液以正胶为掩蔽层对铜层进行湿法腐蚀, 得到电极和压阻结构, 见图 3(d); 最后, 用丙酮溶液腐蚀掉

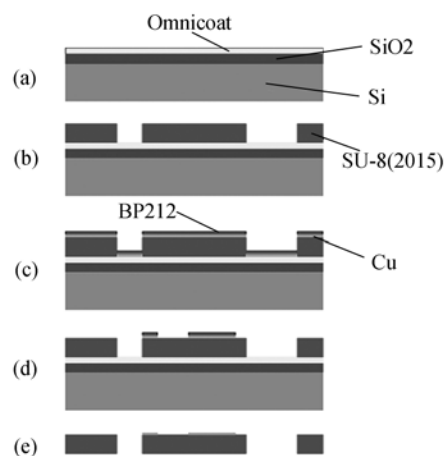


图 3 SU-8 胶微力传感器制作流程图

Fig. 3 Fabrication process of SU-8 micro-force sensor

Omniccoat 胶,使得传感器与基底分离,同时丙酮溶液也将正胶掩蔽层腐蚀掉,见图 3(e)。图 4 为 SU-8 胶微力传感器实物图。

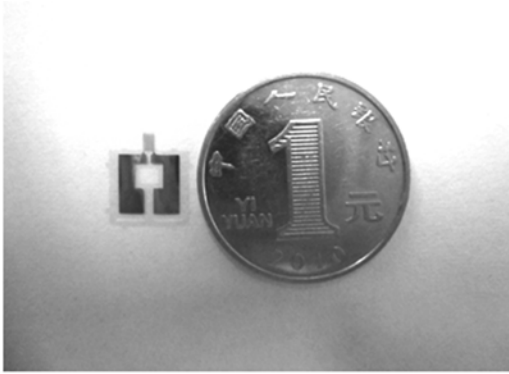


图 4 SU-8 胶微力传感器实物图

Fig. 4 Photograph of SU-8 micro-force sensor

### 3 微力传感器性能测试

#### 3.1 偏转灵敏度测试

为了对微力传感器进行性能测试,本文搭建了一个完整的测量装置,如图 5 所示。使用微针作用于悬臂梁的自由端,通过微位移平台对其施加位移量,使悬臂梁发生弯曲,同时附着在悬臂梁上的压阻将发生阻值变化,此变化通过数字万用表(Agilent 34410A 量程/最小读数:1/0.003)进行测量,可以得出微力传感器的偏转灵敏度曲线,如图 6 所示。

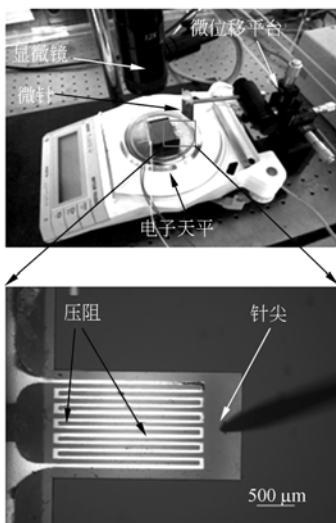


图 5 SU-8 微力传感器测试装置

Fig. 5 Measuring device of SU-8 micro-force sensor

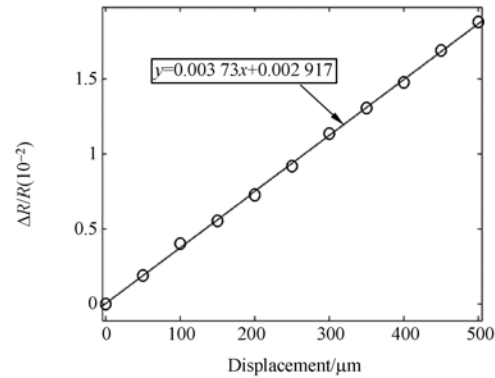


图 6 偏转灵敏度曲线

Fig. 6 Deflection sensitivity curve

由图 6 偏转灵敏度曲线可知  $\frac{\Delta R/R}{\Delta z} = 3.73 \text{ m}^{-1}$ ,由文中公式(2)可知:  $\frac{\Delta R}{R} = K\epsilon$ ,所以可以得到

$$\int_0^{L_s} \frac{d\Delta R}{dR} dx = K \int_0^{L_s} \epsilon(x) dx, \quad (5)$$

$$\int_0^{L_s} \frac{d\Delta R}{dR} dx = \frac{\Delta R}{\rho/A}, \quad (6)$$

$$K \int_0^{L_s} \epsilon(x) dx = \frac{FKtL_s}{2EI} (L_c - L_s/2), \quad (7)$$

由式(6)、(7)可知

$$\frac{\Delta R}{\rho/A} = \frac{FKtL_s}{2EI} (L_c - L_s/2), \quad (8)$$

即  $\frac{\Delta R}{R} = \frac{FKt}{2EI} (L_c - L_s/2)$ ,悬臂梁挠度  $\Delta z = \frac{FL_c^3}{3EI}$

$$\frac{\Delta R/R}{\Delta z} = \frac{3Kt(L_c - L_s/2)}{2L_c^3}, \quad (9)$$

其中  $\Delta R$  为电阻变化量,  $R$  为压阻的初始电阻,  $\Delta z$  为悬臂梁的位移量,  $K$  为电阻应变系数,  $t$  为悬臂梁的厚度,  $L_c$  为悬臂梁的长度,  $L_s$  为单根压阻的长度,  $A$  为压阻横截面积,  $\rho$  为电阻率。由式(9),得到传感器的电阻应变系数  $K = 1.036$ , 其与理论值 1.652 的偏差可能是由实际材料特性与理论值的偏差、制作误差及测量误差引起的。

#### 3.2 力灵敏度测试

如图 5 所示,实验过程中,使用微位移平台对悬臂梁自由端每次提供  $50 \mu\text{m}$  的位移,施加在悬臂梁端部的力通过精密电子天平(METTLER TOLERO AG245 量程/最小读数:41 g/0.01 mg;210 g/0.1 mg)来测得,同时测量电阻、参考电阻、调零电阻与外部两个精密电阻组成惠斯顿电桥,电桥输出的电压信号经过外围放大电路处

理后,由精密万用表(Agilent 34410A 量程/最小读数:1000 V/0.03 mV)读出数值。

图 7 为在力传感器悬臂梁端部施加一定位移下测得的输出电压和力的曲线。通过这两条曲线可以得到微力传感器的力灵敏度曲线,如图 8 所示。由曲线可知,微力传感器在  $0 \sim 350 \mu\text{N}$  之间,具有很好的线性度,力灵敏度为  $0.24 \text{ mV}/\mu\text{N}$ 。

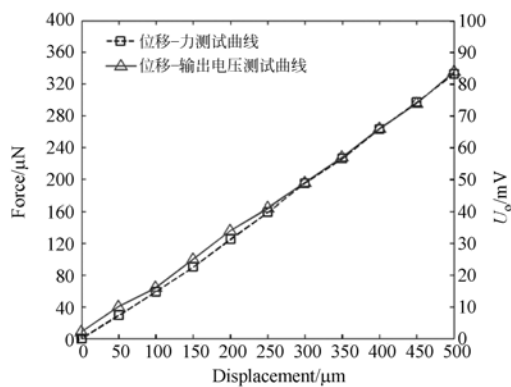


图 7 位移-力、输出电压测试曲线

Fig. 7 Measured curves of force and output voltage versus displacement

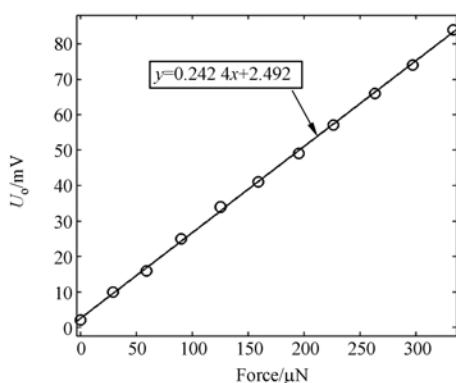


图 8 力灵敏度曲线

Fig. 8 Force sensitivity curve

### 3.3 测量误差分析

测量误差决定了传感器的精度水平,是衡量传感器好坏的一项重要指标。实验中,采用多次重复测量的方法对传感器进行误差分析,利用微位移平台对传感器悬臂梁自由端反复施加  $300 \mu\text{m}$  的位移 10 次,然后记录每次的输出电压,通过标定后的灵敏度曲线计算出力的大小,数据如表 2 所示。

表 2 测量数据

Tab. 2 Measurement data

	输出电压/mV	力/ $\mu\text{N}$
1	46.58	182
2	47.23	185
3	50.06	196
4	48.15	188
5	51.26	201
6	52.11	205
7	47.86	187
8	48.46	190
9	51.33	201
10	50.26	197

根据算术平均值公式

$$L = \frac{1}{n}(l_1 + l_2 + \dots + l_n) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n l_i, \quad (10)$$

得到:  $\bar{F} = 193 \mu\text{N}$ , 由标准偏差公式

$$S_l = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (l_i - l)^2}. \quad (11)$$

得到传感器的标准偏差  $F_l = 7 \mu\text{N}$ 。由于无法获得被测量的真实值,这里使用标准偏差来代替标准误差,得到传感器的测量误差为  $4.06\%$ 。

此款微力传感器适合于 MEMS 领域中静态力或准静态力的测量。在满足工艺要求的条件下可以对悬臂梁的结构尺寸进行优化处理,以提高悬臂梁上表面的平均应力;还可以选择相比铜有着更高电阻应变系数的金属,来提高传感器的性能。

## 4 结 论

本文设计了一种新型的集成蛇形结构金属压阻层的 SU-8 胶悬臂梁微力传感器,并采用一种新颖的湿法腐蚀加工工艺,成功制作出这种具有双层悬臂梁的微力传感器。通过实验测试可知,传感器在  $0 \sim 350 \mu\text{N}$  之间具有很好的线性度,力灵敏度为  $0.24 \text{ mV}/\mu\text{N}$ ,测量误差为  $4.06\%$ ,可以满足对微力的测量。本文提出的制作方法可以将微力传感器集成到其他 MEMS 结构中,使得测量更加方便,而且 SU-8 胶具有良好的生物兼容性和耐腐蚀性,使其在生物化学中也有广泛的应用。

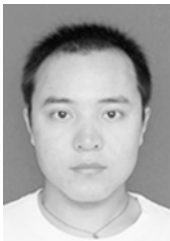
## 参考文献:

- [1] CHUDUC T, CREEMER J F, SARRO P M. Lateral nano-Newton force-sensing piezoresistive cantilever for microparticle handling[J]. *J. Micromech. Microeng.*, 2006, 16:102-106.
- [2] VOSKERICIAN G, SHIVE M S, SHAWGO R S, *et al.*. Biocompatibility and biofouling of MEMS drug delivery devices[J]. *Biomaterials*, 2003, 24: 1959-1967.
- [3] 张立国,陈迪,杨帆,等. SU-8 胶工艺研究[J]. *光学精密工程*, 2002, 10(3):266-269.  
ZHAN L G, CHEN D, YANG F, *et al.*. Research on SU-8 resist photolithography process[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2002, 10(3):266-269. (in Chinese)
- [4] 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)
- [5] GENOLET G, BRUGGER J, DESPONT M, *et al.*. Soft, entirely photoplastic probes for scanning force microscopy[J]. *Review of Scientific Instruments*, 1999, 70(5):2398-2401.
- [6] THAYSEN J, YALCINKAYA A D, VESTERGAARD R K, *et al.*. SU-8 based piezoresistive mechanical sensor[C]. *The Fifteenth IEEE International Conference*, 2002:320-323.
- [7] CALLEJA M, RASMUSSEN P, JOHANSSON A, *et al.*. Polymeric mechanical sensors with integrated readout in a microfluidic system[J]. *SPIE*, 2003, 5116:314-321.
- [8] DOLL J C, NAHID H, KLEJWA N, *et al.*. SU-8 force sensing pillar arrays for biological measurements[J]. *Lab Chip*, 2009, 9(10):1449-1462.
- [9] RASMUSSEN P A, THAYSEN J, BOUWSTRA S, *et al.*. Modular design of AFM probe with sputtered silicon tip[J]. *Sensors and Actuators A*, 2001, 92:96-101.
- [10] WOUTERS K, PUERS R. Determining the Young's modulus and creep effects in three different photo definable epoxies for MEMS applications[J]. *Sensors and Actuators A*, 2009, 156:196-200.
- [11] THAYSEN J, YALCINKAYA A D, VETTIGER P, *et al.*. Polymer-based stress sensor with integrated readout[J]. *Journal of Physics D*, 2002, 35:2698-2703.

## 作者简介:



褚金奎(1965—),男,教授,博士生导师,研究方向为微机械电子系统(MEMS)、微传感器和微执行器、机构学、智能机器人和微机器人。E-mail: chujk@dlut.edu.cn



陈兆鹏(1987—),男,硕士研究生,主要从事 MEMS 微传感器的设计与制作。E-mail: chenzhaopeng3@126.com



张 然(1984—),男,辽宁锦州人,博士研究生,主要从事微执行器,微操作机器人的研究。E-mail: zr1111409@yahoo.com.cn