

文章编号 1004-924X(2009)03-0583-06

## 硅基 PZT 压电功能结构

王 蔚<sup>1</sup>, 田 丽<sup>1</sup>, 刘晓为<sup>1</sup>, 任明远<sup>2</sup>, 张 颖<sup>1</sup>

(1. 哈尔滨工业大学 微电子科学与技术系, 黑龙江 哈尔滨 150001;

2. 哈尔滨理工大学 软件学院, 黑龙江 哈尔滨 150080)

**摘要:**为获得适合单片集成的硅基 PZT 压电功能结构,对近年 PZT 薄(厚)膜在 MEMS 领域的研究现状进行了综述分析,提出了一种新型的双杯 PZT/Si 膜片式功能结构。采用有限元方法对双杯 PZT/Si 膜片进行了结构优化,得到 PZT 和上下硅杯的结构优化值为  $D_{PZT} : D_1 : D_2 = 0.75 : 1.1 : 1$ ,一阶模态谐振频率为 13.2 kHz。以氧化、双面光刻、各向异性刻蚀以及精密丝网印刷等工艺技术制作了双杯硅基 PZT 压电厚膜膜片,膜片具有压电驱动功能,PZT 压电膜厚达 80  $\mu\text{m}$ 。实验表明,双杯 PZT/Si 膜片式功能结构的 MEMS 技术兼容性好,对芯片内其它元件或电路的影响小,适合作为 MEMS 片内执行元件的驱动机构。

**关键词:**PZT;压电功能结构;执行器元件;微机电系统

**中图分类号:**TN384 **文献标识码:**A

## PZT piezoelectric function structure on silicon substrate

WANG Wei<sup>1</sup>, TIAN Li<sup>1</sup>, LIU Xiao-wei<sup>1</sup>, REN Ming-yuan<sup>2</sup>, ZHANG Ying<sup>1</sup>

(1. *Microelectronics department, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;*

2. *Software College, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, China*)

**Abstract:** In order to obtain a PZT piezoelectric function structure on the silicon substrate suitable for monolithic integrated chip, the research status quo of PZT piezoelectric thin (thick) films in the field of MEMS is analyzed, and then a new type of bi-cup PZT/Si film function structure is presented. This structure is optimized and designed with ANSYS finite element analysis software. The optimized structure parameters of the PZT and up-/sub-silicon-cup are  $D_{PZT} : D_1 : D_2 = 0.75 : 1.1 : 1$ ; and the resonant frequency of the first-order modality is 13.2 kHz. The bi-cup PZT piezoelectric thick film on the silicon substrate is fabricated with the oxidation, lithography, anisotropism etching and screen-printing processing, whose thickness is 80  $\mu\text{m}$ , and has piezoelectric driving function. This PZT piezoelectric thick film driving structure with bi-cup on the silicone substrate has a better compatibility with MEMS technique, and is suitable to be a driving component for MEMS micro-actuator.

**Key words:** PZT; piezoelectric function structure; actuator component; Micro-electro Mechanic Systems(MEMS)

收稿日期:2008-05-26;修订日期:2008-07-10.

基金项目:哈尔滨工业大学跨学科交叉性研究基金资助项目(No. HIT. MD2001. 01)

## 1 引言

随着微机械电子系统 (Micro-electro mechanical Systems, MEMS) 技术的进步,对 MEMS 的研究已从最初的微传感器、微执行器等分立器件,到近年来将传感、执行等功能单元和接口电路、信号处理电路等都集成在硅基芯片上,构成功能繁多的片上集成化系统,即对 MEMS 的研究已发展到单片集成芯片结构设计和集成化工艺技术研究阶段。而压电材料是制备微传感器和微执行器的重要功能材料,利用压电效应可将力、加速度信号转变为电信号,实现传感功能;利用逆压电效应可将电压转变为应力或应变,实现执行功能。压电材料在研制单片集成 MEMS 中有广泛用途,特别是压电性能优良的锆钛酸铅系  $[Pb(Zr_xTi_{1-x})O_3]$ , 记为 PZT] 压电薄(厚)膜,在该领域更具发展潜力<sup>[1]</sup>。

当前,在 MEMS 领域对 PZT 薄(厚)膜的研究多集中在 3 个方面:硅基 PZT 薄(厚)膜的兼容工艺研究,硅基 PZT 传感和执行元器件功能结构研究,以及 PZT 在光机电领域的应用研究。S. Bathurst 等人提出了一种 PZT 薄膜制备新工艺——热浆料喷涂成型工艺<sup>[2]</sup>,利用该工艺制备的硅基 PZT 薄膜厚度在  $0.1 \sim 0.4 \mu\text{m}$ ,和集成电路工艺完全兼容。Romain H. 等人对 MEMS 中常用的 PZT 悬臂梁结构进行了性能测试研究<sup>[3]</sup>,PZT 薄膜是采用溅射法淀积在 Pt/TiO<sub>x</sub>/Si/SiO<sub>2</sub> 衬底上,基于梁的位移和谐振频率测量得到 PZT 薄膜的  $d_{31}$ ,  $d_{33}$  等压电特性常数和杨氏模量等机械特性常数。Isaku Kanno 等人研制了 PZT 压电变形镜<sup>[4]</sup>,采用溅射法将厚  $2 \mu\text{m}$  的 PZT 厚膜淀积在 SOI 衬底上,变形镜为膜片结构,利用 PZT 厚膜逆压电效应来驱动镜面变形,如图 1 所示。许晓慧等人提出了一种硅基 PZT 厚膜致动器阵列驱动的 MEMS 微变形镜<sup>[5]</sup>,压电微致动器为  $4 \times 4$  阵列,将 PZT 陶瓷片粘接在硅衬底上,构成硅/PZT 膜片结构,PZT 膜厚为  $48 \mu\text{m}$ ,采用化学腐蚀方法成形。K. Akase 等人研制出一种采用 PZT 压电微镜装置构成的光学微位移传感器<sup>[6]</sup>,用于检测线性运动和角位移,微镜装置为 PZT 悬臂梁结构。娄利飞等人设计了硅基 PZT 薄膜悬臂梁传感器结构<sup>[7]</sup>,采用溶胶-凝胶法制备 PZT

压电薄膜,湿法刻蚀图形化,该结构传感器可用于准静态力,以及动态微力、微压力的测量。吴亚雷等人建立了 PZT 薄膜驱动全光纤相位调制器数学模型<sup>[8]</sup>,该相位调制器是在光纤表面淀积一层 PZT 薄膜,利用电场作用下 PZT 薄膜体积变化引起光纤内部应变,改变光纤的折射率,从而实现相位的调制。

可以看出,当前报道的硅基 PZT 传感和执行元器件的功能结构多为膜片结构和悬臂梁结构。本文提出了一种新颖的双杯 PZT/Si 膜片式功能结构,对该结构进行了优化设计和制作工艺研究。

## 2 双杯 PZT/Si 膜片结构设计

当 PZT 作为 MEMS 片内传感元件、执行元件的功能材料时,PZT 多是直接淀积在硅基片上构成硅基 PZT 薄(厚)膜的悬臂梁或膜片功能结构的。如图 1、图 2 所示。

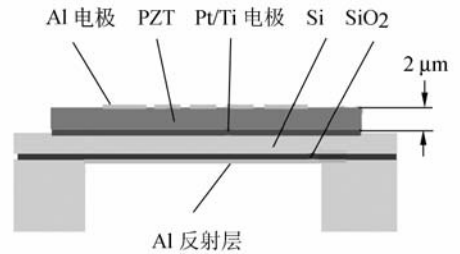


图 1 硅基 PZT 厚膜膜片变形镜结构示意图<sup>[4]</sup>  
Fig. 1 Deformable mirror structure of PZT thick film on silicon substrate

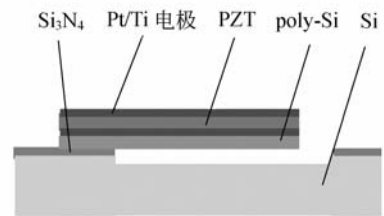


图 2 硅基 PZT 薄膜悬臂梁结构示意图<sup>[7]</sup>  
Fig. 2 Cantilever structure of PZT film on silicon substrate

图 1、图 2 两种 PZT/Si 功能结构都适用于 PZT 压电薄(厚)膜较薄的场合。若 PZT 膜是十

几至几十微米的厚膜, PZT 在硅晶片上的台阶过高, 将影响后续工艺操作, 即片内集成 PZT 厚膜存在平坦化问题。而 PZT/Si 功能结构是利用 PZT 的横向压电效应来实现传感或执行功能的。当 PZT/Si 功能结构作为传感元件时, PZT 压电体受力或加速度作用, 悬臂梁或膜片形变或振动, 基于横向压电效应在 PZT 的上下电极产生电荷或交变电压, 由荷电量或交变电压幅值、频率得到力或加速度量。当 PZT/Si 功能结构作为执行元件时, 在 PZT 压电体上下电极加载直流或交变电压, 基于横向逆压电效应 PZT 膜收缩或延伸, 悬臂梁或膜片弯曲或振动驱动执行元件实现其功能。

由压电效应公式和应力定义有:

$$T_1 = e_{31} E_3, \quad (1)$$

$$F_1 = T_1 l_2 l_3, \quad (2)$$

式中,  $T_1$  为 PZT 长度方向应力,  $E_3$  为 PZT 厚度方向电场强度,  $e_{31}$  为压电常数,  $F_1$  为长度方向压电力,  $l_2$  为 PZT 膜宽度,  $l_3$  为 PZT 膜厚度。

由式(2)可知压电力( $F_1$ )和 PZT 膜厚( $l_3$ )成正比。当 PZT 膜厚在亚微米到几微米之间时, 压电力有限, 不适合作为要求压电力较大元器件的功能结构, 特别是执行器元件如微泵、微阀等。为此设计了一种新颖的双杯硅基 PZT 膜片式功能结构, 如图 3 所示。

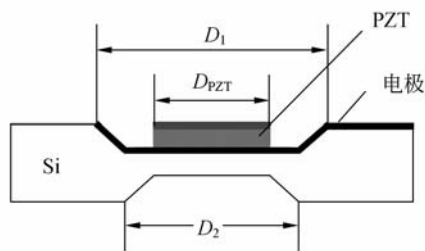


图3 双杯 PZT/Si 膜片式功能结构示意图

Fig. 3 Structure of bi-cup PZT/Si film function structure

双杯 PZT/Si 膜片结构是将 PZT 薄(厚)膜元件制作在上硅杯中, 采用正胶或聚酰亚胺等平坦化物填充在 PZT 周围, 无论 PZT 膜厚度是亚微米至几微米, 还是十几微米至几十微米, 只要上硅杯深度随 PZT 厚度变化, PZT 一侧硅片表面都能实现平坦化。然后, 在 PZT 背面制作下硅杯, 以及其它元件。最后, 去除平坦化物得到双杯

PZT/Si 膜片结构。因下硅杯一侧硅片表面可采用 IC 工艺集成其它元件或电路, 且双杯 PZT/Si 膜片工作时, 膜片的弯曲或振动都在两个硅杯内, 不会影响到片上其它元器件, 所以, 双杯 PZT/Si 膜片结构是实现片内集成的 MEMS 压电功能结构。

## 2 双杯 PZT/Si 膜片结构优化

双杯 PZT/Si 膜片式功能结构在 PZT 为厚膜时更具优势, 即适合于驱动力较大的执行器件, 如可用于微泵的驱动。对双杯 PZT/Si 膜片式功能结构的优化是基于逆压电效应, 通过静态分析得出直流电压引起的膜片弯曲挠度的变化, 通过模态分析得出交变电压引起的膜片振动谐振频率的变化。

PZT/Si 膜片形变时, 应力与应变关系服从胡克定律, 逆压电效应和胡克定律联立得到压电方程为:

$$T_j = c_{ji}^E S_i - e_{nj} E_n, \quad (3)$$

$$D_n = e_{mi} S_i + \epsilon_{mm}^s E_n, \quad (4)$$

式中,  $T_j$  为应力,  $S_i$  为应变,  $c_{ji}^E$  为弹性刚度系数,  $e_{nj}$ ,  $e_{mi}$  为压电常数,  $D_n$  为电位移,  $E_n$  为电场强度,  $\epsilon_{mm}^s$  为介电常数。

双杯 PZT/Si 膜片式功能结构的模拟分析是一个压电-机电多场耦合分析问题, 在 MEMS 领域通常采用 MATLAB 或 ANSYS 商用软件<sup>[9-10]</sup>进行模拟分析。在此沿用作者早前文献<sup>[10]</sup>中的有限元分析方法, 用 ANSYS 软件进行模拟。PZT 压电厚膜仍使用 PZT5H 材料参数, 硅膜与 PZT 膜厚度均为  $100 \mu\text{m}$ , 驱动电压取  $1 \text{ V}/\mu\text{m}$ 。

图 4 是当双杯结构尺寸固定时, 静态模拟得到的 PZT 直径变化对膜片中心形变挠度(也就是最大挠度)的影响。由膜片最大挠度和 PZT 直径关系曲线可知, 当上硅杯直径和 PZT 厚膜直径比( $D_1/D_{\text{PZT}}$ )为 0.75/1.0 时, 膜片形变最大, 最大挠度约为  $12 \mu\text{m}$ 。

图 5 是当 PZT 尺寸一定, 静态模拟得到的上下硅杯的结构尺寸对 PZT/Si 膜片形变最大挠度的影响。由上下硅杯直径比( $D_1/D_2$ )和最大挠度关系曲线可知, 当上下硅杯尺寸接近, 即  $D_1/D_2$  为 1.1/1 时膜片形变大, 且下硅杯尺寸对压电膜片形变的影响大于上硅杯。

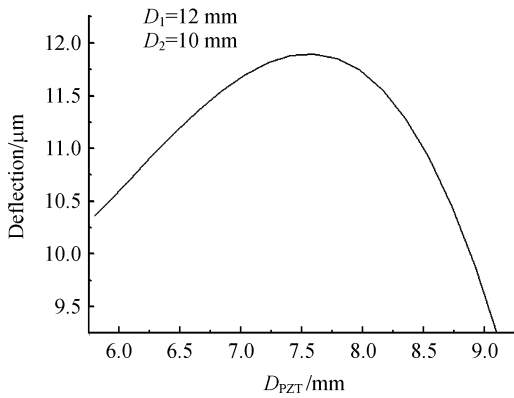


图 4 膜片形变最大挠度与 PZT 直径的关系

Fig. 4 Relation between max deflection of film deformation and PZT diameter

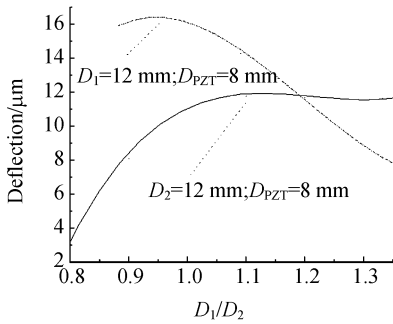


图 5 膜片形变最大挠度和硅杯尺寸的关系

Fig. 5 Relation between max deflection of film deformation and silicon cup dimension

结合图 4、图 5 曲线,双杯 PZT/Si 膜片有最大形变的优化尺寸为: $D_{PZT} : D_1 : D_2$  为 0.75 : 1.1 : 1。

图 6 是模态分析双杯 PZT/Si 膜片的四阶谐振图形。一阶模态振动稳定性好,且膜片振动弯曲扫过的体积最大,对微泵类执行器件来说,体积变化越大驱动作用也就越大。所以,双杯 PZT/Si 膜片在 MEMS 元器件上的实际应用多采用一阶振动模态。

图 7 是膜片结构尺寸对一阶模态谐振频率的影响。谐振频率随上下硅杯直径的增大而减小,其中,随下硅杯直径变化更明显,而 PZT 膜直径对其影响很小。

由文献[11]可知,PZT 厚膜密度和压电常数  $d_{31}$  与 PZT5H 材料参数有差距,这将带来模拟误差,但模拟结果和文献[10]趋势相同,所以,仍可

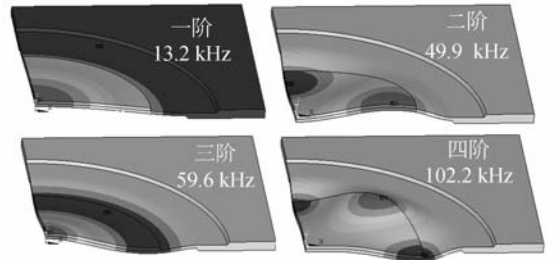


图 6 双杯硅基压电膜片振动模态的 1/4 图

Fig. 6 1/4 vibration modality of bi-cup PZT/Si piezoelectric film

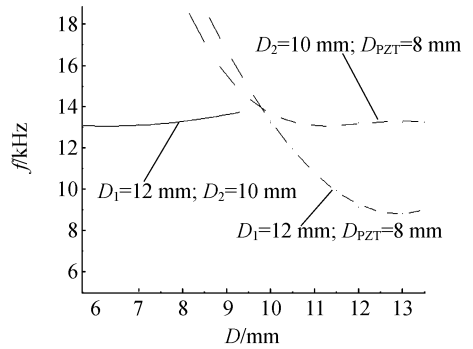


图 7 膜片谐振频率与 PZT 膜直径的关系

Fig. 7 Relation between film resonant frequencies with PZT film diameters

利用模拟结果优化双杯 PZT/Si 膜片结构。其中, $D_{PZT} : D_1 : D_2$  优化值为 0.75 : 1.1 : 1,一阶模态振动稳定性好,通过调节下硅杯直径来调节谐振频率。另外,由膜片最大挠度曲线来确定上下硅杯深度,确保膜片工作时其形变不超出硅杯表面,影响到芯片上其它元件。

### 3 制作工艺

采用 IC 工艺、硅 KOH 各向异性刻蚀技术和精密丝网印刷工艺制作双杯硅基 PZT 厚膜功能结构,工艺流程如图 8 所示。

双面抛光(100)硅片是经氧化、光刻、刻蚀、溅射、剥离工艺制作出带 Pt 下电极的上硅杯结构。这部分工艺是 MEMS 技术中的常用工艺,其要点是上硅杯深度应比 PZT 厚膜深约 20  $\mu\text{m}$ ,以利于 PZT 厚膜的制备和表面平坦化。PZT 厚膜采用精密丝网印刷工艺制备<sup>[10]</sup>,精密丝网印刷是厚膜集成电路标准工艺,与 MEMS 技术兼容。采

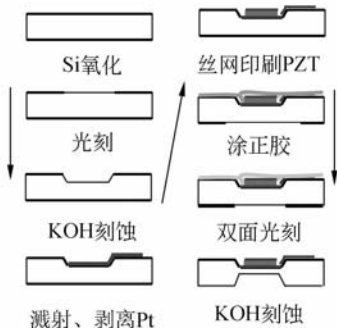


图8 双杯硅基PZT厚膜工艺流程

Fig.8 Fabricating process of bi-cup PZT thick film on silicon substrate

用该工艺可通过印刷直接得到所需的图形化PZT厚膜结构,避开PZT厚膜光刻腐蚀难度大的问题,一次印刷膜厚达几至十几微米,经多次对板套印至所需厚度,再烧结,印刷Ag上电极,极化得到PZT压电厚膜。下硅杯制作前先在PZT周围涂满正胶,平坦化后双面光刻,采用黑漆粘结玻璃来保护PZT面,KOH刻蚀出下硅杯。在KOH刻蚀过程中PZT烧结带来的PZT/Si界面热应力释放,膜片弯曲。

这种新颖的双杯硅基PZT压电厚膜功能结

构的制备工艺和MEMS技术兼容。将制出的双杯硅基PZT压电厚膜作为文献[12]提出的双向无阀微泵的驱动元件,其中PZT压电厚膜共套印了4次,厚度约80 μm。将该驱动元件试封装在泵体上构成双杯PZT/Si膜片驱动双向微泵。从对该泵的初步测试结果看,具有泵送特性,但性能差且不稳定,还有待进一步深入研究。

## 4 结 论

PZT压电薄(厚)膜是制备MEMS传感元件和执行元件重要的功能材料。双杯硅基PZT压电膜片式功能结构在PZT膜较厚时,可通过在上硅杯中填充正胶来实现PZT一侧表面平坦化,利于下硅杯刻蚀和其它元件或电路的集成,且压电膜片工作时,PZT/Si膜片的弯曲或振动都在两个硅杯内,不会影响到片上其它元器件。模拟分析得到PZT和上、下硅杯的结构优化值为: $D_{PZT} : D_1 : D_2 = 0.75 : 1.1 : 1$ ,一阶模态谐振频率为13.2 kHz,振动稳定。采用氧化、双面光刻、KOH腐蚀和PZT丝网印刷工艺可制备出双杯硅基PZT压电厚膜,PZT膜厚度达80 μm。双杯PZT/Si膜片式功能结构的MEMS技术兼容性良好。

## 参考文献:

- [1] MINH D N, KORAY KNGUY K, *et al.*. Piezoelectric materials for MEMS applications[C]. *3rd IEEE Int. Conf. NAMS*, 2008; 315-318.
- [2] BATHURST S, LEE H W, KIM S G. Direct printing of lead zirconate titanate thin films for micro-electromechanical systems[C]. *MEMS 2008, Tucson, AZ, USA, January 13-17, 2008*.
- [3] ROMAIN H, DAVID J, *et al.*. A silicon cantilever beam structure for the evaluation of  $d_{31}$ ,  $d_{33}$  and  $e_{31}$  piezoelectric coefficients of PZT thin films[C]. *Applications of ferroelectrics*, 2007. *ISAF. 16th IEEE Int. Sym.* 2007; 725-727.
- [4] ISAKU K, TAKA AKI K. Development of deformable mirror composed of piezoelectric thin films for adaptive optics[J]. *IEEE. J. selected topics in quantum electronics*, 2007, 13(2): 155-11.
- [5] 许晓慧, 冯艳, 刘爽, 等. MEMS变形镜用PZT厚膜致动器阵列的制备及性能表征[J]. *纳米技术与精密工程*, 2007, 5(4): 261-265.
- [6] XU X H, FENG Y, LIU SH, *et al.*. Fabrication and characterization of PZT thick film actuators array for MEMS deformable mirror[J]. *Nanotechnology and Precision Engineering*, 2007, 5(4): 261-265. (in Chinese)
- [7] AKASE K, SAWADA R, *et al.*. Combined device of optical microdisplacement sensor and PZT-Actuated micromirror[J]. *IEEE*, 2007; 199-200.
- [8] 姜利飞, 杨银堂, 李跃进等. 硅基PZT压电薄膜微传感器的结构设计和实验研究[J]. *半导体学报*, 2007, 28(5): 778-782.
- [9] LOU L F, YANG Y T, LI Y J, *et al.*. Structural design and testing of silicon-based PZT thin film micro-sensors[J]. *Chinese Journal of Semiconductors*, 2007, 28(5): 778-782.
- [10] 吴亚雷, 吴有金, 朱龙洋, 等. PZT薄膜驱动的全光纤相位调制器数学模型[J]. *光学精密工程*, 2007, 15(2): 230-236.

- WU Y L, WU Y J, ZHU L Y, *et al.*. Mathematical model of all-fiber phase modulators with lead zirconate titanate coating[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(2): 230-236. (in Chinese)
- [9] 陈海初. 压电陶瓷驱动球基微驱动器的动力学研究[J]. *光学精密工程*, 2007, 15(2): 248-253.  
CHEN H CH. Dynamical research on spherical micro actuator with PZT drivers[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(2): 248-253. (in Chinese)
- [10] 王蔚, 刘晓为, 陈伟平, 等. 压电膜片的优化设计及在微泵中的应用[J]. *压电与声光*, 2006, 28(2): 153-155.  
WANG W, LIU X W, CH W P, *et al.*. CHEN Wei-ping, Piezoelectric diaphragm used in micropump based on its design and optimization[J]. *Piezoelectrics & Acoustooptics*, 2006, 28(2): 153-155. (in Chinese)
- [11] 王蔚, 刘晓为, 蓝慕杰, 等. MEMS 兼容 PZT 压电厚膜性能的测试[J]. *光学精密工程*, 2004, 12(3): 72-75.  
WANG W, LIU X W, LAN M J, *et al.*. Capability test of PZT piezoelectric thick film compatible with MEMS[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2004, 12(3): 72-75. (in Chinese)
- [12] 王蔚, 田丽, 鲍志勇, 等. 一种新型压电式双向无阀微泵的研制[J]. *传感技术学报*, 2006, 19(5): 2018-2021.  
WANG W, TIAN L, BAO ZH Y, *et al.*. Research and Fabrication of a Bi-directional Piezoelectric micropump[J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuator*, 2006, 19(5): 2018-2021.

#### 作者简介:



王蔚 (1960—), 上海人, 女, 博士, 副教授, 1983 年于华东工程学院获学士学位, 1993 年于华东工学院获硕士学位, 2007 年于哈尔滨工业大学获博士学位, 主要从事微电子技术与 MEMS 器件的教学与科研工作。E-mail: wangwei@hit.edu.cn



任明远 (1978—), 男, 黑龙江哈尔滨人, 硕士, 哈尔滨理工大学软件学院讲师, 主要从事集成电路和微电子的教学和科研工作。E-mail: rmy2000@126.com



田丽 (1973—), 女, 黑龙江呼兰人, 副教授, 博士, 1995 年、2002 年、2009 年分别于哈尔滨工业大学获学士、硕士和博士学位, 主要从事 MEMS 传感器与微系统, Microfluidics 微流控芯片技术的研究。E-mail: tianli@hit.edu.cn



张颖 (1983—), 女, 内蒙古赤峰人, 哈尔滨工业大学硕士研究生, 研究方向为微流体系统。E-mail: zyh@live.cn



刘晓为 (1955—), 男, 北京人, 博士, 教授, 博导, 1982 年、1988 年、2003 年分别于哈尔滨工业大学获学士、硕士和博士学位, 主要从事微电子与 MEMS 领域的科研与教学工作。E-mail: lxw@hit.edu.cn