

文章编号 1004-924X(2005)06-0674-07

基于柔性 MEMS 皮肤技术温度传感器阵列的研究

肖素艳, 车录锋, 李昕欣, 王跃林

(中国科学院 上海微系统与信息技术研究所 传感技术国家重点实验室, 上海 200050)

摘要:采用 MEMS 皮肤技术,在聚酰亚胺柔性衬底上成功研制出 8×8 阵列铂薄膜热敏电阻温度传感器。实验采用热氧化硅片为机械载体,以便于旋涂液态聚酰亚胺柔性衬底上器件的加工。最后用湿法腐蚀方法将柔性器件从载体上释放下来。试验表明聚酰亚胺衬底上的铂薄膜热敏电阻与温度的变化具有良好的线性,其电阻温度系数达 $0.0023/^\circ\text{C}$ 。与固态聚酰亚胺膜衬底相比,采用旋涂液态聚酰亚胺解决了制备中遇到的两大主要困难:其一,消除了涂聚酰亚胺衬底与载体界面之间的气泡,聚酰亚胺衬底表面能保持良好平整度;其二,制备过程中由于热循环而使柔性衬底产生的热膨胀明显减小。这种柔性温度传感器阵列易贴于高曲率物体表面以探测小面积温度场分布。

关键词:皮肤技术;聚酰亚胺;柔性衬底;铂薄膜电阻;温度传感器

中图分类号:TP212.11 **文献标识码:**A

A temperature sensor array based on flexible MEMS skin technology

XIAO Su-yan, CHE Lu-feng, LI Xin-xin, WANG Yue-lin

(State Key Laboratory of Transducer Technology, Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China)

Abstract: A 8×8 array platinum film resistor temperature sensor on polyimide flexible substrate was successfully fabricated based on MEMS skin technology. The flexible polyimide substrate were formed by spin-coating liquid polyimide on a thermally oxidized silicon wafer. The wafer was used as a mechanical carrier for the flexible substrate during device fabrication. The finished flexible devices were finally separated from the carrier by wet etching. The test results show that the platinum film resistor temperature sensors on polyimide substrates exhibit excellent linearity and the temperature coefficient of resistance is close to $0.0023/^\circ\text{C}$. The spin-coated liquid polyimide solves two major problems comparing with the solid polyimide sheets as a flexible substrate. First, flatness of the flexible substrate is maintained with no air bubbles between the interface of polyimide and silicon. Second, the thermal expansion of the flexible substrates during the fabrication process due to thermal cycling is reduced greatly. The flexible skin with a temperature sensor array can be easily attached on a highly curved surface to detect temperature distribution inside a small area.

Key words: skin technology; polyimide; flexible substrate; platinum film resistor; temperature sensor

收稿日期:2005-09-01;修订日期:2005-09-16.

基金项目:国家 863 高技术研究发展计划资助项目(No. 2003AA404090)。

1 引言

随着微加工技术的不断改善,硅基 MEMS 微温度传感器得到了迅速发展,传感器的尺寸变得越来越小,其动态响应也因热惯性的减小而得到显著的改善^[1],而且传感器阵列结构使得大面积多点同时测量成为可能,然而传统硅基 MEMS 温度传感器因衬底比较硬而难以满足非平面物体特别是高曲率复杂几何体表面温度实时监控的应用需求。例如在机器人传感系统、可折叠电子器件、生物技术、航空动力学等特殊应用场合中^[2],采用柔性 MEMS 技术来解决曲面物体表面温度、压力、剪切应力等物理量的实时测量就很困难。

关于可贴在任意非平面物体表面的柔性 MEMS 传感器的制作方法的报道较多,其中大部柔性器件是以聚酰亚胺膜为柔性衬底将由化学方法刻蚀而成的许多独立硅岛连接起来。如 Barth^[3]等人早在 1985 年报道了有关一维柔性硅二极管温度传感器阵列结构,该器件的硅岛利用各向同性腐蚀形成,其边缘较薄容易被破坏而导致电路连线出现故障。1994 年 Beebe 和 Denton^[4]利用相似的方法提出改善柔性聚酰亚胺皮肤的坚固性和可靠性想法,但并没有研究柔性皮肤器件。近来 Fukang Jiang^[5-6]等人研究新的柔性 MEMS 加工技术,采用聚酰亚胺(PI)将许多独立的类似“三明治”结构的硅岛连在一起研制出柔性剪切应力传感器阵列,创建了一种将 MEMS 器件集成于柔性聚酰亚胺的新型柔性 MEMS 智能皮肤技术。该器件中的硅岛采用近似垂直的各向异性等离子刻蚀方法形成,明显提高了硅岛边缘的强度,并且利用该器件成功实现了无人驾驶飞行器(UAV)中三角机翼气流分离的实时探测。最近,柔性 MEMS 皮肤技术逐渐引起学者们的关注^[7-10],但是柔性 MEMS 传感器技术离实用化程度尚有距离,尤其我国在这方面更需加强研究力度,不断完善器件功能,以满足许多重要特殊场合的应用需求。本文针对 MEMS 许多领域中非平面物体多维温度场分布的实时检测需要,提出一种利用液态旋涂聚酰亚胺柔性衬底制作的微温度传感器阵列。

2 传感器阵列结构设计

2.1 热敏电阻单元

铂薄膜热敏电阻具有尺寸特别小、宽温度范围内($-190 \sim +630^{\circ}\text{C}$)精度高、线性好、热响应快、长期稳定性高、机械性能好且易于与集成电路相匹配等特点^[11]。本实验采用溅射的金属铂薄膜作为温度传感器的热敏电阻。设一个金属薄膜电阻器(如图 1)的长度为 L ,宽度为 W ,厚度为 D ,电阻率为 ρ ,由于其电阻值 R 与长度 L 成正比,与横截面积 S 成反比,即:

$$R = \rho \times \frac{L}{S}, \quad (1)$$

其中

$$S = W \times D, \quad (2)$$

代入(1)得

$$R = \rho \times \frac{L}{W \times D} = \frac{\rho}{D} \times \frac{L}{W} = \frac{\rho}{D} \times N, \quad (3)$$

如果定义 $R_{\square} = \frac{\rho}{D}$ 为方块电阻, $N = \frac{L}{W}$ 为方块数,则

$$R = R_{\square} N, \quad (4)$$

由上述可知,对于给定的金属电阻率 ρ ,方块电阻 R_{\square} 大小由金属薄膜的厚度 D 决定,金属薄膜电阻值由方块电阻 R_{\square} 数 N (金属膜的总线长与线宽之比)来确定。

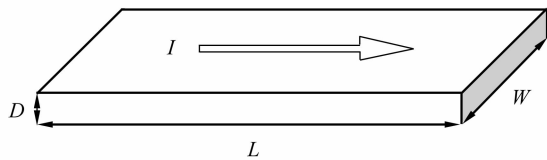


图 1 金属薄膜电阻器示意图

Fig. 1 Schematic of the metal film resistor

为了使铂薄膜达到一定厚度并具有一定的阻值,必须使膜形成一定的图形,图形的设计主要决定铂薄膜线条的几何尺寸。为了减小图形的几何结构,铂薄膜电阻设计成细长条迂回折线状。另一方面,由于金属的几何尺寸(线宽 W 和厚度 D)是影响金属薄膜与聚酰亚胺表面粘附性的重要因素^[12-13],因此设计时需综合考虑确定薄膜电阻的几何尺寸。设计的铂薄膜电阻单元结构,其线宽为 $20 \mu\text{m}$,厚度为 $0.1 \mu\text{m}$,每个电阻单元含有 104

个方块电阻。

2.2 电阻单元的排列

为实现物体表面多点大面积物理量的同时测量,将器件设计成 8×8 阵列式结构。首先设计热敏电阻的标准单元,然后将标准单元扩展,形成 8×8 阵列结构,并用引线互连,最后将引线引出到压焊块。标准单元间拓扑结构的设计中,每个金属铂薄膜电阻器有两个引脚,扩展成为 8×8 的阵列,对于标准单元间的拓扑结构及单元之间引线方式需优化设计。

实现 8×8 的阵列结构主要有如下 3 种不同方法排列电阻单元。其一将 8×8 传感器的电极完全独立,那么共需 128 条引线引出,这无论对于器件的封装还是测试都非常困难;其二用引线将每个传感器的一端全部连接起来,形成一个共用端,这样最后的引线数目 $8 \times 8 + 1 = 65$;最后一种是将 64 个传感器像阵列式键盘一样,完全按照 8 行 8 列划分,每一行或每一列只共用一条引线,最后引线的数目是 $8 + 8 = 16$ 。测试时,确定一条行线和一条列线,64 个传感器就可以一一确定了。但这样虽引线数目最少,可行线和列线必须做在不同层上,给制作工艺带来极大的困难,层与层之间的互连与隔离也不容易实现,同样很难保证器件的可靠性以及成品率。

结合上述 3 种设计方案的特点,拟采用第二种排列方案实现 8×8 阵列结构,整个结构的版图由铂电阻、金电极和压焊块 3 部分组成(如图 2)。

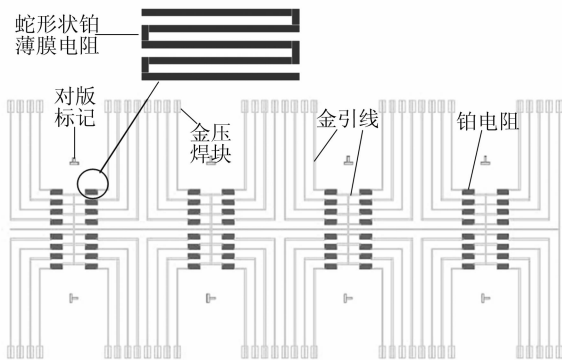


图 2 温度传感器阵列的版图设计

Fig. 2 Layout design of the temperature sensor arrays

3 制造工艺

聚酰亚胺(PI)材料是一类在化合物分子中含有酰胺功能团的有机高分子聚合物材料。通常由

有机芳香族四酸二酐和有机芳香族二胺在有机溶剂中通过缩合反应生成聚酰亚胺可溶性的前置体-聚酰胺酸(PAA)溶液,然后将 PAA 溶液加热脱水环化或加入脱水剂制成固态 PI。PI 在比较宽的温度范围内仍能保持优异的耐热性能、力学机械性能、介电性能以及很好的物理化学稳定性能等综合性能,同时还具有良好可形成平整面能力和制图性能。优异的耐热性使得 PI 能够承受在其表面形成金属薄膜时(如溅射)所产生的高温环境;良好的可形成平整面能力使得 PI 适合于各种不同分辨率的光刻技术,不溶不熔性可保证 PI 在用湿法化学刻蚀金属薄膜过程中不受损伤^[14-15],因而 PI 是柔性 MEMS 皮肤技术的理想材料。

实验采用了上海交通大学高分子材料研究所提供的 PI5 前置体-高粘度液态 PAA。为了对柔性衬底上的器件加工,采用比较硬的硅片为载体。首先将载体热氧化形成牺牲层,然后在其上面旋涂 PAA,通过适当热固化后形成 PI 薄膜,并在柔性 PI 膜上制作温度传感器,最后将 PI 衬底器件从硅片上释放下来。其主要工艺流程是:

(1) 将硅片热氧化,生成适当厚度的 SiO_2 牺牲层,如图 3(a);

(2) 为得到一定厚度的 PI 膜,4 次重叠旋涂聚酰胺酸,然后采用"由表及里"的阶梯式加热方法,使 PAA 涂层中的溶剂和水分子及时充分挥发出去,将液态 PAA 固化成表面质量和性能良好的固态 PI 膜,如图 3(b);

(3) 溅射 20 nm 的 Ti/W 合金(其中 Ti 与 W 含量之比为 20:80)粘附层及 100 nm 的 Pt 薄膜,然后光刻图形化,形成电阻条,如图 3(c)。金属薄膜与聚酰亚胺薄膜表面之间的粘附性能是聚酰亚胺在 MEMS 应用中的关键技术之一。在沉积金属之前,将 PI 表面进行适当的等离子处理,可以提高金属与 PI 表面的粘附性^[16-18]。等离子处理 PI 表面可去掉 PI 表面的污染物质,提高表面的吸湿性以及表面微观形貌(增加微观粗糙度),从而增加金属与 PI 膜的粘附性能,而且在溅射过程中适当提高基片温度,有利于金属薄膜材料原子和基片原子之间的相互扩散,也有利于形成扩散附着和通过中间层附着^[19];

(4) 溅射 20 nm 的 Ti/W 合金粘附层及 200 nm 的 Au 薄膜,然后光刻图形化形成电极,如图 3(d);

(5) 涂覆 PAA 保护层。将柔性温度传感器粘贴在物体表面测量时,需保护电极,使电极与被

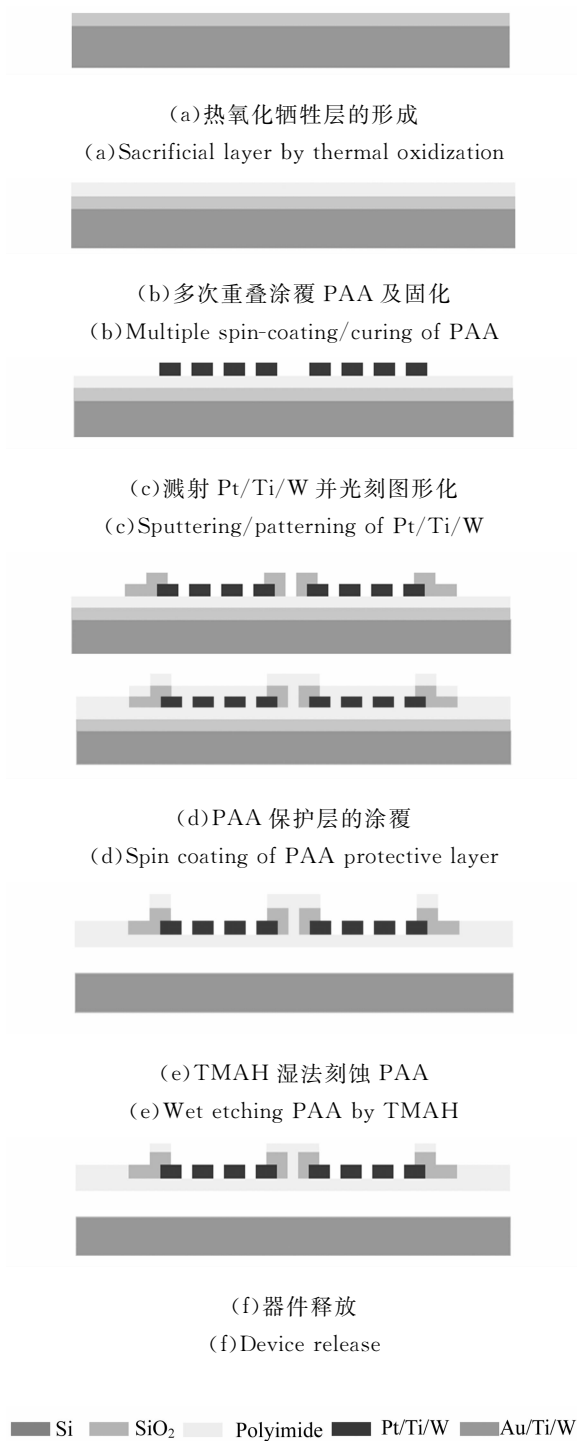
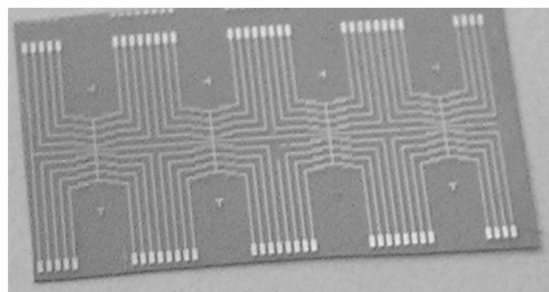
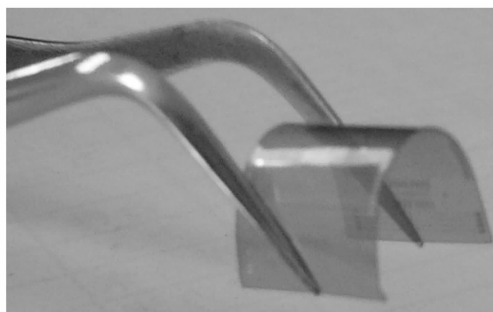


图 3 聚酰亚胺柔性衬底微温度传感器阵列工艺流程简图

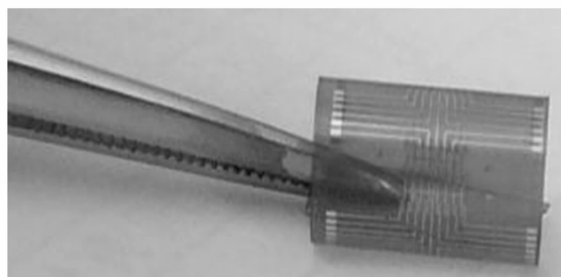
Fig. 3 Simplified fabrication process flow of the micro-machined temperature sensor arrays on flexible polyimide



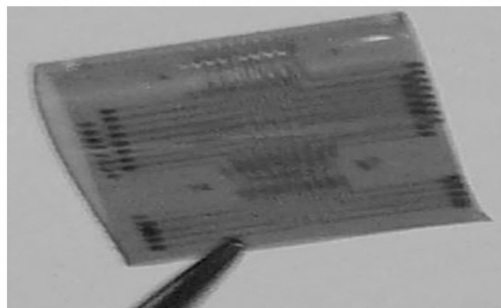
(a)平面图
(a)Planar photograph



(b)弯曲图
(b)Bendable photograph



(c)弯曲图
(c)Bendable photograph



(d)弯曲图
(d)Bendable photograph

图 4 释放后 PI 衬底上 8x8 微温度传感器阵列器件的 4 种状态

Fig. 4 Four states of the 8x8 micro temperature sensor arrays on the polyimide after release

测物体表面实现电隔离。在电极表面涂覆一层 PI 薄膜作为隔离层,并采用 TMAH 溶液刻蚀 PAA,同时暴露热敏单元和压焊块,如图 3(e);

(6) 柔性衬底上器件的释放。释放之前在器件表面旋涂一层光刻胶以保护 Pt 电阻和 Au 电极。为了加快释放速度,在 HF 腐蚀溶液中加入适当的 HCl 溶液减小释放液的 pH 值^[20],实验用体积比为 1:1 的 HF(49%)和 HCl(36%)混合液腐蚀牺牲层,将 PI 膜从硅片上分离下来,如图 3(f)。该释放方法的特点是不需要腐蚀孔即可将大面积的 PI 膜从硅片上分离下来。图 4(a)-(d)为 PI 从载体硅片上释放下来后 8×8 阵列样品的 4 种状态,由图可看出基于 PI 膜衬底的器件具有良好的机械柔性。

4 试验测试及讨论

4.1 铂薄膜电阻单元的电阻温度系数(TCR)

若电阻温度系数 α 与温度无关,那么材料的电阻 R 与温度 t 之间的关系可表示为

$$R(t) = R(t_0) + \alpha(t - t_0), \quad (5)$$

则

$$\alpha = \frac{R(t) - R(t_0)}{t - t_0} = \frac{\Delta R}{\Delta t}. \quad (6)$$

其中 t_0 为参考温度,通过测量热敏电阻的阻值随环境温度的变化关系,计算得到 TCR 值。

实验采用探针台(Cascade Microtech 公司制造)完成热敏电阻的热性能测试。该探针台具有驱动电路系统和温度场控制系统。测试时给被测试样施加 1 mA 的恒定驱动电流,并同时给被测试样施加温度场,使其从参考温度(25℃)缓慢升高到 200℃,测得热敏电阻的在测试温度范围内(25~200℃)电阻随温度的变化关系曲线(如图 5),通过式(6)可计算出热敏电阻的 TCR。由图 5 很明显可看出铂薄膜热敏电阻具有良好的线性,从回归曲线得出热敏电阻的 TCR 为 0.0023/℃,比铂电阻正常温度系数(0.0039/℃)偏低。造成这种差异主要原因可能有:金属电子在其晶界处发生散射而导致 TCR 降低^[21],这可通过将金属膜退火增大其晶粒尺寸来提高 TCR,但铂的退火温度需高于 600℃,与集成电路和聚酰亚胺膜(分解温度不高于 500℃)的工艺不兼容^[22];另外在测试过程中,测试系统的环境温度控制不够理想,使

得铂薄膜电阻的实际温度比环境温度偏低,这样式(6)中 $R(t)$ 比实际值偏小,即 ΔR 值偏小,因而 α 也相应偏小了,这需要通过改善测试系统中被测试样环境温度的控制精度来减小测试误差。

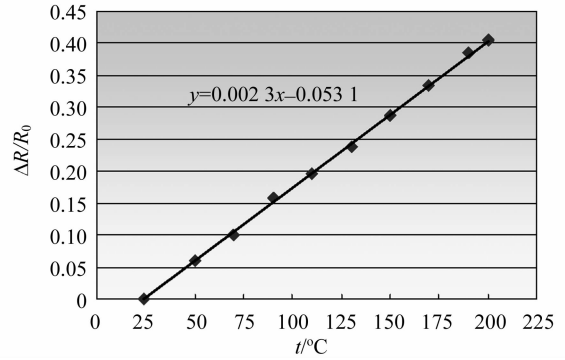


图 5 微热单元的电阻比随环境温度升高的变化关系
Fig. 5 Electrical resistance ratio of the heater element versus the surrounding temperature

4.2 稳态条件下铂薄膜电阻的电流电压(I-V)曲线

稳态条件下热敏电阻的 $I-V$ 曲线是衡量温度传感器热性能的一种有效方法。微热温度传感器是单一的电阻器,根据 $I-V$ 曲线上可以得出热敏电阻的阻值和功率,热敏电阻的温度也可通过其 TCR 和电阻的变化计算出来。图 6 为被测试样在温度为 25℃时,驱动电流为 0~2.2 mA 条件下测得的 $I-V$ 曲线,而图 7 是同一被测试样在 200℃时,驱动电流为 0~18 mA 条件下测得的 $I-V$ 曲线。由图 6、图 7 可知,被测试样在恒定温度下,驱动电流比较小范围内,热敏电阻的 $I-V$ 曲线基本成直线;从图 7 还可以看出,当驱动电流增大

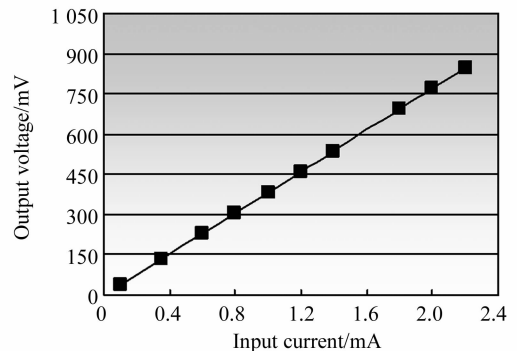


图 6 在 25℃时,微传感器的输入电流与电压之间的关系
Fig. 6 Current-voltage relationship of a micro sensor at the temperature of 25°C

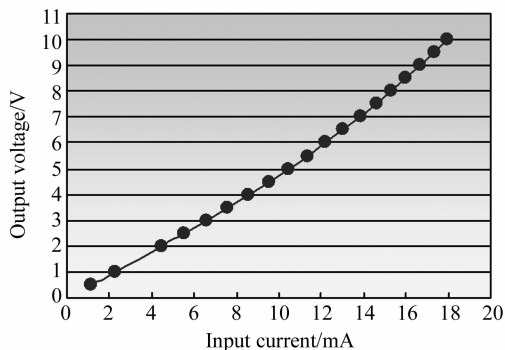


图 7 在 200℃时,微传感器的输入电流与电压之间的关系

Fig. 7 Current-voltage relationship of a micro sensor at the temperature of 200℃

到一定值时,热敏电阻的 $I-V$ 开始向上偏离直线,这是由于热敏电阻的热功率与驱动电流成平方关系,当驱动电流升高到比较大时,热敏电阻的自热效应比较明显,热敏电阻温度将随热功率的增加而变化明显,而且铂薄膜热敏电阻温度系数为正(0.0023/℃),从而导致热敏电阻的阻值随驱动电流的增加而升高,所以 $I-V$ 曲线向上偏离直线。

参考文献:

- [1] HUANG J B, TUNG S, HO C M, *et al.* Improved micro thermal shear-stress sensor [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 1996, 45(2):570-574.
- [2] 于靖军,宗光华,毕树生. 全柔性机构与 MEMS[J]. *光学精密工程*, 2001, 9(1): 1-5.
YU J J, ZONG G H, BI SH SH. Fully compliant mechanisms and MEMS[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2001, 9(1): 1-5. (in Chinese)
- [3] BARTH P W, BERNARD S L, ANGELL J B. Flexible circuit and sensor arrays fabricated by monolithic silicon technology [J]. *IEEE Transducers Electron. Device*, 1985, ED-32(7): 1202-1205.
- [4] BEEBE D J, DENTON D D. A flexible polyimide based package for silicon sensor[J]. *Sensors and Actuators*, 1994, A (44):57-64.
- [5] JIANG F K, LEE G B, TAI Y C, *et al.* A flexible micromachine-based shear-stress sensor array and its application to separation point detection [J]. *Sensors and Actuators*, 2000, (79): 194-203.
- [6] JING F, TAI Y CH, WALSH K, *et al.* A flexible MEMS technology and its first application to shear stress sensor skin [C]. *Micro Electro Mechanical Systems*, 1997. *MEMS '97 Proceedings, IEEE, the 10th International IEEE Workshop on MEMS (MEMS'97), Nagoya Castle, Japan*, 1997: 465-470.
- [7] YILDIZ A C, ELIK-BUTLER Z, BUTLER D P. Microbolometers on a flexible substrate for infrared detection [J]. *IEEE Sensor Journal*, 2004, 4(1): 112-117.
- [8] ENGEL J, CHEN J, LIU C. Development of polyimide flexible tactile sensor skin [J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2003, 13:359-366.
- [9] HAN J S, TAN Z Y, SATO K, *et al.* Thermal characterization of micro heater arrays on a polyimide film substrate for fingerprint sensing applications [J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2005, 15: 282-289.
- [10] 薛伟,王晶,崔天宏. 基于 MEMS 微加工技术的高灵敏度隧道传感器的研究[J]. *光学精密工程*, 2004, 12(5):

5 结 论

采用金属铂薄膜为热敏电阻,在液态旋涂聚酰亚胺衬底上研制出 8×8 阵列微温度传感器。与采用固态聚酰亚胺膜为衬底的加工方法相比,采用液态旋涂聚酰亚胺薄膜消除了衬底与硅片界面之间存在气泡的影响,提高了聚酰亚胺表面的平整度,而且热塑性引起的变形也明显减小,器件制作成品率也得到相应的提高。实验利用湿法释放方法,以热氧化物为牺牲层而不需增加腐蚀孔,可将大面积的聚酰亚胺薄膜从硅片上释放下来,试验结果表明铂薄膜热敏单元具有良好的线性,其电阻温度系数达 0.0023/℃。整个器件制作在低温下进行($<320^\circ\text{C}$),工艺简单,成本低,器件尺寸小,质量轻,可靠性高,机械柔性好,可贴在任意非平面上实现各种几何体表面的二维或三维温度场实时分布情况的测量。该柔性微温度传感器阵列的研制可为柔性 MEMS 传感技术的进一步研究与开发提供一定的基础。

491-203.

XUE W, WANG J, CUI T H. Highly sensitive micromachined tunneling sensors[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2004, 12(5): 491-203. (in Chinese)

- [11] 温宇峰, 祖光裕, 胡明, 等. Pt 薄膜热敏电阻工艺研究[J]. 电子元件与材料, 2002, 21(9): 9-10.
WEN Y F, ZU G Y, HU M, *et al.* Study of Pt thin film thermal resistor technology [J]. *Electronic Components & Materials*, 2002, 21(9): 9-10. (in Chinese)
- [12] CHIU S L, JENG Y H, ACOSTA R E, *et al.* Reliability and fracture of metal-polymer structures with fine-line geometries [C]. *Circuits and Systems*, 1990, *IEEE International Symposium*, 1990, 3: 2108 - 2111.
- [13] POON T W, LEU J, KASTHURIRANGAN J, *et al.* Adhesion and fracture analysis of metal/polyimide fine line structures [J]. *Journal of Applied Physics*, 1994, 76(9): 5515-5523.
- [14] 杨士勇. 聚酰亚胺材料在微电子工业中的应用[J]. 半导体情报, 1998, 35(4): 51-54.
YANG SH Y. Polyimide materials for microelectronics applications[J]. *Semiconductor Information*, 1998, 35(4): 51-54. (in Chinese)
- [15] 杨士勇. 高性能聚酰亚胺材料在 MCM-D 中的应用[J]. 半导体技术, 1998, 23(6): 41-45.
YANG SH Y. Advanced polyimide materials for MCM-D application[J]. *Semiconductor Technology*, 1998, 23(6): 41-45. (in Chinese)
- [16] MUKKAVILLI S, PASCO R W, FAROOQ M S, *et al.* Plasma processes for thin film surface treatment [C]. *Electronic Components and Technology Conference*, 1990. *Proceedings*, 40th 20-23 May, 1990: 737-745.
- [17] LI W T, CHARTERS R B, LUTHER-DAVIES B, *et al.* Significant improvement of adhesion between gold thin films and a polymer [J]. *Applied Surface Science*, 2004, 233: 227-233.
- [18] NAKAMURA Y, SUZUKI Y, WATANABE Y. Effect of oxygen plasma etching on adhesion between polyimide films and metal[J]. *Thin Solid Films*, 1996, 290-291: 367-369.
- [19] 周鸿仁, 刘秀蓉, 徐蓓娜. 直流磁控溅射铂电阻薄膜[J]. 电子科技大学学报, 1997, 26(6): 662-665.
ZHOU H R, LIU X R, *et al.* Resistance film of platinum by D. C. magnetron sputtering[J]. *Journal of UEST of China*, 1997, 26(6): 662-665. (in Chinese)
- [20] CANG L H. Study of PSG sacrificial etch solutions used in surface micromaching processing [J]. *Proceedings of Symposium on Microstructures and Micro Fabricated System*, 1994, 14: 97-85.
- [21] MAYADAS A F, SHATZKES M. Electrical-resistivity model for polycrystalline film; the case of arbitrary reflection at external surfaces [J]. *Physical Review B*, 1970, 1(4): 1382-1389.
- [22] SEDKY S. Experimental determination of the maximum post process annealing temperature for standard CMOS wafers[J]. *IEEE Trans. Electron Devices*, 2001, 48: 377-385.

作者简介: 肖素艳(1977—), 女, 湖南邵阳人, 中国科学院上海微系统与信息技术研究所在读博士研究生, 主要研究方向为柔性 MEMS 传感器技术。