

[19] 中华人民共和国国家知识产权局

[51] Int. Cl.  
G01K 7/16 (2006.01)



# [12] 发明专利申请公布说明书

[21] 申请号 200710042881.3

[43] 公开日 2007年12月5日

[11] 公开号 CN 101082523A

[22] 申请日 2007.6.27

[21] 申请号 200710042881.3

[71] 申请人 中国科学院上海微系统与信息技术研究所

地址 200050 上海市长宁区长宁路865号

[72] 发明人 车录锋 肖素艳 李昕欣 王跃林

[74] 专利代理机构 上海智信专利代理有限公司  
代理人 潘振甦

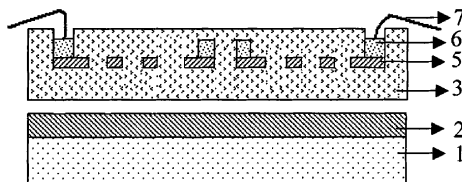
权利要求书2页 说明书9页 附图4页

## [54] 发明名称

一种柔性温度传感器的制作方法

## [57] 摘要

本发明公开了一种柔性温度传感器的制作方法。其特征在于首先在载体硅片上涂覆一层聚二甲基硅氧烷(PDMS)中间夹层,在室温固化后,用氧等离子体活化其表面;紧接着在上面重叠涂覆高粘度聚酰亚胺(PI)预聚体并用阶梯式工艺进行预固化,其后在上面重叠沉积所有金属层,并依次用剥离技术和湿法腐蚀图形化形成金属温敏电阻及电连接;再在最上层涂覆一薄层低粘度PI保护膜,用湿法刻蚀露出金属压焊块部分;然后将器件放在热板上并将柔性载体上的中间夹层剥下来,最后将分离后的柔性器件置于烘箱中以完全固化两PI膜层,这样实现了PDMS和PI与MEMS工艺兼容。所述的制作方法简单、成本低、成品率高,而且有望实现批量生产及高密度传感器的集成。



1、一种柔性 MEMS 温度传感器的制作方法，其特征在于以普通单抛硅片为加工载体，先在硅片上涂覆一层聚 PDMS 中间夹层，并将 PDMS 中间夹层表面进行氧等离子体活化处理，紧接着在所述的中间夹层上面重叠 PI 预聚体，经过阶梯式热固化后，形成 PI 薄膜，然后在 PI 薄膜上连续沉积电阻和电连接所有的金属薄膜层并依次用剥离和湿法刻蚀方法形成温敏电阻及其电连接，再在最上面涂覆一薄层绝缘保护层 PI，并通过湿法刻蚀将电连接的压焊块区域露出来，接着将加工载体硅片及所制作的器件放置于的热板上，同时用薄刀片和尖头镊子将 PI 衬底从载体硅片上的 PDMS 中间夹层分离下来，最后将柔性器件放进烘箱使两结构层 PI 层完全固化；所述 PDMS 为聚二甲基硅氧烷，PI 为聚酰亚胺。

2、按权利要求 1 所述的柔性温度传感器的制作方法，其特征在于所述的聚二甲基硅氧烷中间层厚度为 40—50 $\mu\text{m}$ ，它采用二次变速方法涂覆于加工载体上的，初始速度为 150rpm，使被涂覆的 PDMS 覆盖在整个硅片上，在缓慢提速至 900rpm，保持 40s，然后再缓慢提速至 4500rpm，并在室温下固化 48h；

3、按权利要求 1 所述的柔性温度传感器的制作方法，其特征在于中间夹层为 PDMS 预聚体和固化剂以质量比为 6:1~10:1 混合，并抽真空处理 15min，以去除混合液中的气泡。

4、按权利要求 1 所述的柔性温度传感器的制作方法，其特征在于中间夹层表面的活化处理是采用氧等体活化处理，处理条件为 100%氧气，压强为 10mTorr，功率为 75W，时间为 30s。

5、按权利要求 1 所述的柔性温度传感器的制作方法，其特征在于所述的 PDMS 中间夹层上面四次重叠涂覆液态高粘度 PI 预聚体的阶梯式热固化的工艺是每重叠涂覆一次的转速比前一次的转速提高 200rpm；每次重叠涂

覆后的预烘温度比前一次高 5℃，并采用“由表及里”的阶梯式热处理方法预固化 PI 预聚物；最后一次 PI 预热聚体涂覆后，热板温度由 95℃上升到 200℃保温 15min，然后缓慢降温至室温；所述 PI 预聚体的粘度为 6000—7000 mPa·s，形成 PI 薄膜厚度为 35—45mm。

6、按权利要求 1 所述的柔性温度传感器的制作方法，其特征在于金属薄膜和剥离是涂覆正性光刻胶，并将光刻胶在热板上 90℃，预烘 3min，对准曝光并显影露出预沉积金属层的窗口；然后氧等离子活化 PI 表面，PI 表面活化条件为：150W，100% O<sub>2</sub>，时间为 3min。

7、按权利要求 1 所述的柔性温度传感器的制作方法，其特征在于所述的温敏电阻和电连接的沉积和图形化是所述金属薄膜为黏附层 TiW、Pt 薄膜和 Au 连续重叠溅射形成；用丙酮剥离掉掩膜层及其上面的金属层，而与 PI 衬底紧密接触的所需要的金属温敏电阻及其电连接的 TiW/Pt 金属层区域保留下来；然后用重量比 KI:I<sub>2</sub>:H<sub>2</sub>O=4:1:40 的碘化钾溶液选择腐蚀掉非电连接部分区域的 Au 薄膜，露出其下面的 TiW/Pt 金属层，从而同时实现温敏电阻 TiW/Pt 和电连接 TiW/Pt/Au 的图形化。

8、按权利要求 1 所述的柔性温度传感器的制作方法，其特征在于所述的最上层 PI 绝缘保护层的涂覆是在最上层旋涂 2μm 厚的 PI 预聚体，并在热板上 80℃、105℃、140℃分别预烘 5min、4min、4min；接着涂覆约 1.3μm 光刻胶掩膜层并在 100℃热板上预烘 90s；对准曝光，其曝光时间增加为正常曝光时间的 2.5 倍，然后用正胶显影液腐蚀 PI 的预聚体直至露出电连接的压焊块。

9、按权利要求 1 所述的柔性温度传感器的制作方法，其特征在于将 PI 衬底从载体硅片上的 PDMS 中间体夹层分离的温度为 100℃。

10、按权利要求 1 所述的柔性温度传感器的制作方法，其特征在于释放后柔性器件放置于有氮气保护的烘箱中，从室温逐渐升至 275 预℃，然后缓慢降温至室温，使 PI 预聚体完全固化。

## 一种柔性温度传感器的制作方法

### 技术领域

本发明涉及一种柔性 MEMS 温度传感器的制作方法，属于制造微机电系统（MEMS）领域。

### 背景技术

随着微加工技术的不断发展，传统硅基 MEMS 传感器由于衬底比较硬，已不足以满足诸如可佩戴电子器件、可折叠电子器件、机器人传感系统和智能皮肤等要求柔性结构器件的日益增长的应用需求，因此在柔性衬底上制作 MEMS 器件的技术越来越引起学者们的关注。由于聚酰亚胺（PI）具有独特而优异的综合性能而被选为理想的柔性衬底材料。其电热隔离性能好，机械强度高、抗化学腐蚀性能强，高温稳定性良好。近来关于在 PI 衬底上制作温度、流体、位置、压力等柔性 MEMS 传感器报道不断增多，已经研制的大部分 MEMS 传感器的性能与其相对应的硅基 MEMS 传感器的器件的基本性能相当。其中在 PI 衬底上制作的以金属薄膜为温敏电阻的柔性温度传感器及其阵列与硅基温度传感器相比优点更为突出，而且其应用非常广泛，如由于 PI 本身具有良好的热隔离性能，所以不需要制作热隔离腔体，使得器件的结构轻薄，制作工艺简单，成本降低，成品率升高，有望实现批量生产。而且器件的机械强度高，可挠性好，可贴附在任意形状的物体表面实现温度的即时探测。

采用 PI 为柔性衬底制作温度传感器的方法主要有两种。第一种方法是采用已成型的固态 PI 膜片为衬底，用粘结剂将其暂时贴附在载体硅片上，然后在 PI 衬底上沉积金属薄膜制作温敏电阻及其电连接，最后将制作好的

柔性器件从载体上剥离下来。J.S. Han 等人已经制作出用于指纹识别的柔性温度传感器阵列 (J.S. Han, Z.Y. Tan, K. Sato and M. Shikida. Thermal characterization of microheater arrays on a polyimide film substrate for finger print sensing applications. *J. Micromech. Microeng.* 15 (2005)282~289)。第二种方法则是利用液态 PI 预聚体重叠涂覆形成一定厚度的 PI 柔性衬底。这种方法首先在加工载体硅片上沉积一层牺牲层 (如 PSG 或 Al)，接着在其上面重叠涂覆液态 PI 预聚体并完全固化形成 PI 柔性衬底，然后在 PI 柔性衬底上面沉积金属薄膜并图形化形成金属温敏电阻及其电连接，最后将去除牺牲层将柔性器件从载体硅片上释放下来。G.B. Lee 等人也采用 Al 做牺牲层在 PI 衬底上制作出  $40\times 1$  的柔性温度传感器阵列。(G.B. Lee, F.C. Huang, C. Y. Lee. J. M. A new fabrication process for a flexible skin with temperature sensor array and its applications. *Acta. Mechanica Sinica.* 20 (2) (2004):140~145)，我们之前也采用 PSG 做牺牲层成功制作出  $8\times 8$  制作柔性温度传感器。(Suyan Xiao, Lufeng Che, Xinxin Li, Yuelin Wang. A cost-effective flexible MEMS technique for temperature sensing. *Microelectronics Journal*, accepted)。上述这两种制作方法中，第一种制作方法相对较简单，可以采用硅基 MEMS 的加工仪器设备完成器件的制作。但是采用贴附 PI 膜法不可避免存在如下问题：首先贴附的 PI 与载体硅片之间难免不存在气泡，其次在热循环过程中，在热应力的作用下，PI 易发生塑性变形，所以在后续工艺所必需的高温条件下，被贴附在载体硅片上的 PI 薄膜易发生移位，这给对准光刻带来很大的困难，从而降低了器件成品率。第二种方法在很大程度上避免了第一种方法所存在的问题，涂覆 PI 衬底明显减小了热循环的影响，在加工过程中涂覆的 PI 柔性衬底能保持平整而且不会发生位移。液态 PI 预聚体涂覆层充分固化后与已经成型的固态 PI 薄膜具有基本相似的性能，因此液态 PI 预聚体是一种非常理想的柔性材料，然而第二种制作方法中的将 PI 柔性器件从加工载体硅片上的释放下来仍然是一个很大的挑战。将载体硅片与 PI 柔性衬底之间的大面积牺牲层完全释放不仅费时，而且长时间将器件浸泡在释放液中将不同程

度地影响柔性器件性能及其结构的完整性。综上所述，尽管从目前来看，液态 PI 预聚体是一种理想的柔性衬底材料，但是如何轻易将柔性温度传感器阵列从加工载体硅片上分离下来而且还能保证器件的完整性，这是必须要考虑的问题。这也是本发明主要的目的所在。实际上，这也是其它以液态 PI 预聚体为柔性衬底的 MEMS 器件从加工载体上分离所遇到的困难，比如 Ali Yildiz 在制作用于红外探测的柔性微测辐射热仪时也提出了类似的问题（Ali Yildiz, Zeynep Celik-Butler, Donald P. Butler. Microbolometers on a Flexible Substrate for Infrared Detection. IEEE Sensors Journal. 4(1) 2004:112~117）。很明显以液态 PI 预聚体为柔性衬底的器件的分离方法还需要根据柔性器件的结构特征及其制作工艺来优化其分离技术。

### 发明内容

为了弥补普通刚性 MEMS 温度传感器的不足，本发明的目的在于提供一种基于柔性衬底的温度传感器的制造方法。本发明所提供的方法特别涉及了一种将柔性温度传感器从加工载体硅片上的分离下来的方法，是在加工载体硅片 PI 柔性衬底之间涂覆一层 PDMS 中间夹层，由于 PI 与 PDMS 的之间的粘附性能比较差，在热应力作用下有助于柔性器件的分离。

本发明提供的一种柔性 MEMS 温度传感器的制作方法，是以普通单抛硅片为加工载体，先在硅片上涂覆一层约 40—50 $\mu\text{m}$  的 PDMS 中间夹层，有助于最后柔性器件的分离，并将 PDMS 中间夹层表面进行活化处理，紧接着在 PDMS 中间夹层上重叠涂覆液态 PI 预聚体，从而形成 35—45 $\mu\text{m}$  厚度的 PI 薄膜，再在 PI 薄膜上沉积金属薄膜并通过剥离和光刻图形化同时形成温敏电阻及其电连接，然后在最上面涂覆一薄层 PI 柔性绝缘保护层，并通过湿法图形化将电连接的压焊块区域露出来，此后将载体硅片及所制作的器件放置于 100 $^{\circ}\text{C}$  的热板上，借助尖头镊子和薄刀片将 PI 从载体硅片上的 PDMS 中间夹层上剥下来，最后将柔性器件放进烘箱使两结构层 PI 膜充分固化。本发明所述的柔性温度传感器制作方法具体的步骤如下：

(1) 准备加工载体硅片：以普通单抛硅片作为整个柔性温度传感器加工的载体；

(2) PDMS 中间夹层的制备：将 PDMS 预聚体与固化剂以质量比为 6:1~10:1 的比例混合，缓慢搅拌并抽真空处理 15min 以去除混合液中的气泡。为获得均匀平整的 PDMS 中间夹层，采用三次变速方法涂覆 PDMS，具体涂覆方法为：将足量的 PDMS 预聚体滴加在载体硅片中心，初始转速为 150rpm 保持 30s，直到被涂物覆盖在整个硅片上，再缓慢提速到 900rpm，并保持 40s，然后缓慢提速到 4500rpm 并在室温下固化 48h，得到约 50 $\mu$ m 的 PDMS 中间夹层。由于固化后的 PDMS 表面呈现出疏水性质，因而采用氧等离子体技术活化 PDMS 表面，活化过程中产生的自由基与氧气接触，在 PDMS 表层生成过氧化物与其他含氧功能团，而并不改变 PDMS 本来的性质，使得相应的 PDMS 表面的亲水性增加，从而改善了 PDMS 表面与被沉积物质之间的粘附性能。表面活化处理条件为：100%氧气，功率 75W，压强为 10mTorr，时间 30s；

(3) PI 柔性衬底的制备：在活化处理后的 PDMS 中间夹层表面涂覆液态高粘度 PI 预聚体，为了达到一定的厚度，采用连续四次重叠涂覆的方法。第一次的旋涂的速度为 2000rpm，旋涂时间为 50s，涂覆后在热板上 80 $^{\circ}$ C 预烘 5min。每次重叠涂覆的转速比前一次转速提高 200rpm，每次重叠涂覆后的预烘温度比前一次温度提高 5 $^{\circ}$ C，由于薄膜比较厚，采用热板以实现“由表及里”的热处理方法，使 PI 预聚体中的溶剂充分及时挥发出来而避免表面产生气泡等缺陷。最后一次涂覆后，将 PI 预聚体涂覆层在热板上从 95 $^{\circ}$ C 缓慢上升到 200 $^{\circ}$ C，并保温 15min，然后再缓慢降温至室温，以尽可能减少热循环的影响；

(4) 金属薄膜剥离及光刻胶掩模层图形化：涂覆正性光刻胶，并将光刻胶在热板上 90 $^{\circ}$ C，预烘 3min，对准曝光并显影露出预沉积金属层的窗口；然后氧等离子活化 PI 表面，使 PI 表面有一定粗糙度和具有活性的化学键而提高与预沉积金属层的黏附性能，PI 表面活化条件为：150W，100% O<sub>2</sub>，时

间 3min;

(5) 金属温敏电阻和电连接沉积及图形化: 所有金属薄膜包括黏附层 TiW (200Å)、Pt 薄膜 (1200 Å) 和 Au (3000 Å) 连续重叠溅射形成而不需中断溅射室的真空; 并丙酮剥离掉掩膜层及其上面的金属层, 而与 PI 衬底紧密接触的所需要的金属温敏电阻及其电连接的 TiW/Pt 金属层区域保留下来; 然后用碘化钾溶液 (重量比 KI:I<sub>2</sub>:H<sub>2</sub>O=4:1:40) 选择腐蚀掉非电连接部分区域的 Au 薄膜, 露出其下面的 TiW/Pt 金属层, 这样同时实现温敏电阻 TiW/Pt 和电连接 TiW/Pt/Au 的图形化;

(6) 最上层 PI 绝缘保护层的涂覆及图形化: 为了保护温敏电阻及其电连线, 在最上层旋涂 2μm 厚低粘度 PI 预聚体, 并在热板上 80°C、105°C、140°C 分别预烘 5min、4min、4min; 接着涂覆约 1.3μm 光刻胶掩膜层并在 100°C 热板上预烘 90s; 对准曝光, 其曝光时间增加为正常曝光时间的 2.5 倍, 然后用正胶显影液腐蚀 PI 的预聚体直至露出电连接的压焊块;

(7) 柔性温度传感器的分离: 将载体硅片及其上面的器件放置于 100°C 的热板上, 用尖头镊子和薄刀片将 PI 从载体硅片上的 PDMS 中间夹层上剥下来;

(8) 两 PI 结构薄膜的二次热固化: 将释放后的柔性器件放置于有氮气保护的烘箱中, 将烘箱从室温逐渐升温到 275°C, 然后缓慢降到室温, 使 PI 预聚体完全固化。

综上所述, 本发明柔性温度传感器的制作只需三块掩膜版, 制作工艺简单, 成本低廉, 成品率高, 此方法同样适合由众多这种柔性温度传感器单元组成阵列的制造, 而且有望实现批量生产及高密度传感器的集成; 特别本发明中 PDMS 中间夹层的引进有助柔性器件的分离的方法对其它有些 PI 柔性 MEMS 技术如柔性模拟探针的研究有一定意义。

本发明所述的柔性温度传感器及其制作方法主要有如下特点:

(1) 采用本发明柔性 MEMS 皮肤技术制作温度传感器与普通刚性 (如硅和玻璃等) MEMS 温度传感器相比有如下优点: 由于 PI 本身具有良好的



热隔离性能，所以不需要制作绝热隔热腔体，从而使提供的制作工艺简单、成本低廉、结构轻薄，机械强度高，热响应快、可挠性好，并且可贴附在任意几何形状的物体表面即时探测温度场的分布；

(2) 柔性衬底由以液态高粘度 PI 预聚体重叠涂覆在加工载体硅片上而形成合适厚度的柔性 PI 衬底，与现有的固态 PI 膜片贴附在硅片上的方法相比较，该方法明显减少了由热循环引起的塑性变形，从而提高器件的成品率；

(3) 温敏电阻及其电连接的金属薄膜连续重叠沉积而不必中断溅射腔体中的真空度，这使得金属与 PI 的黏附性能得到很大的改善，也有助于器件成品率的提高；

(4) 由于 PI 与 PDMS 的热膨胀系数相差较大，在热应力作用下二者的粘附性能较差，所以在加工载体硅片及液态 PI 预聚体形成的 PI 衬底之间涂覆一层 PDMS 中间夹层有助于柔性器件的分离，这对有些 PI 柔性技术的研究有一定的作用；

(5) 由于 PDMS 不能耐高温 ( $>250^{\circ}\text{C}$ )，而 PI 的完全固化需在高温下完成，采用柔性器件分离前和分离后两个阶段完成 PI 的固化，通过工艺优化组合，实现了两有机物 PDMS 及 PI 与 MEMS 工艺兼容。

## 附图说明

图 1 为本发明制造方法的流程简图

图 1(a) PDMS 中间夹层的涂覆、固化及表面活化处理；

图 1(b) PI 预聚体的涂覆及预固化，形成柔性衬底；

图 1(c) 剥离工艺，光刻胶图形化，形成金属层沉积窗口；

图 1(d)金属层 TiW/Pt/Au 的溅射及剥离工艺；

图 1(e) 对准光刻图形化生成 TiW/Pt 温敏电阻及 TiW/Pt/Au 电连接；

图 1(f) 再次涂覆 PI 预聚体绝缘保护薄层，采用湿法刻蚀露出电连接的压焊块部分。

图 1(g) 柔性器件的释放及 PI 的二次固化

- |          |        |
|----------|--------|
| 1—Si     | 2—PDMS |
| 3—PI 层   | 4—光刻胶  |
| 5—TiW/Pt | 6—Au   |
| 7—外粘导线   |        |

图 2 为本发明制作的柔性 MEMS 温度传感器单元结构示意图

(a) 剖面俯视图

(b) 横截面图

3—PI 层

5—TiW/Pt

6—Au

图 3 为  $8 \times 8$  柔性温度传感器阵列的排布方式图

图 4 为  $8 \times 8$  柔性温度传感器阵列中 5 个温敏单元的电阻变化随温度的变化关系，即温敏电阻的电阻温度系数特性曲线。

### 具体实施方式

下面具体介绍一种实施实例，进一步说明本发明的方法同样适合由众多这种柔性温度传感器单元组成的传感器阵列的制造。

参见图 3 是 64 个温度敏感单元排布成  $8 \times 8$  阵列式结构：整个阵列的面积大小为  $2500 \times 5500 \mu\text{m}^2$ ，阵列中敏感单元为蛇形状，单元尺寸线长 $\times$ 线宽 $\times$ 线厚为  $644 \mu\text{m} \times 4 \mu\text{m} \times 0.12 \mu\text{m}$ ，面积大小为  $68 \times 68 \mu\text{m}^2$ 。

按照本发明所述的柔性 MEMS 温度传感器的制作方法制造。器件加工过程中以普通单抛硅片为载体提供平整的加工面，首先在机械加工载体硅片上涂覆一层  $50 \mu\text{m}$  的 PDMS 中间夹层有助柔性器件的分离，接着在 PDMS 上四次重叠涂覆液态 PI 预聚体生成  $40 \mu\text{m}$  柔性 PI 衬底，然后在 PI 衬底上制作金属电阻 TiW/Pt 和 TiW/Pt/Au 电极，并在最外层涂覆一层  $2 \mu\text{m}$  的柔性 PI 薄膜起绝缘保护电极作用，最后将硅片载体及其上面的器件放置于  $100^\circ\text{C}$  的热板上，由于 PI 与 PDMS 的热膨胀系数及弹性模量相差较大，因此在热应

力的作用下，PDMS 与 PI 的界面粘附性降低，最后借助薄刀片和镊子将 PI 柔性器件从硅片载体上的 PDMS 中间夹层上剥离下来。

该 8×8 柔性 MEMS 温度传感器阵列的具体制作步骤如下：

(1)PDMS 中间夹层的形成：将 PDMS 预聚体与固化剂以质量比为 6:1~10:1 的比例混合，缓慢搅拌并抽真空处理 15min 以去除气泡，由于 PDMS 是非牛顿流体，为获得平整均匀 PDMS 中间夹层薄膜，采用三次变速方法涂覆 PDMS，具体方法为：将足量的 PDMS 预聚体滴加在载体硅片中心，初始转速为 150rpm 保持足够长的时间，直到被涂物覆盖在整个硅片，再缓慢提速到 900rpm，并保持 40s，最后缓慢提速到 4500rpm 并在室温下固化 48h。由于固化后 PDMS 表面是疏水性质，所以在 PDMS 上沉积被涂物时将 PDMS 在氧等离子体中进行活化处理，以增加与被沉积物质的粘附性能。处理条件为：100%氧气，功率 75W，压强为 10mTorr，时间 30s。如图 1(a)

(2) 四次重叠涂覆液态高粘度 (6000~7000 mPa·s) PI 预聚体涂层以获得 40 $\mu$ m 的厚度 PI 衬底：在 PDMS 中间夹层表面四次重叠涂覆液态高粘度 PI 预聚体 (6000~7000 mPa·s)，第一次的旋涂的速度为 2000rpm，旋涂时间为 50s，涂覆后在热板上 80 $^{\circ}$ C 预烘 5min。为了提高 PI 薄膜的性能，每次重叠涂覆的转速比前一次转速提高 200rpm，每次重叠涂覆后的预烘温度比前一次温度提高 5 $^{\circ}$ C。由于薄膜比较厚，采用热板以实现“由表及里”的热处理方法，使 PI 预聚体中的溶剂充分及时挥发出来而避免表面产生气泡等缺陷。最后一次涂覆后，将 PI 预聚体涂覆层在热板上从 95 $^{\circ}$ C 缓慢上升到 200 $^{\circ}$ C，并保温 15min，然后从缓慢降温至室温，以尽可能减少热循环的影响；如图 1 (b)

(3) 金属层剥离工艺的正性光刻胶掩膜层的图形化：在 PI 衬底上涂覆一层正性光刻胶，并将光刻胶在热板上 100 $^{\circ}$ C，预烘 2min，对准曝光并显影露出预沉积金属窗口；并采用氧等离子活化 PI 表面，使 PI 表面有一定粗糙度和具有活性的化学键从而提高与金属的黏附性能，PI 表面活化条件：150W，100%氧气，时间 3min；如图 1(a)

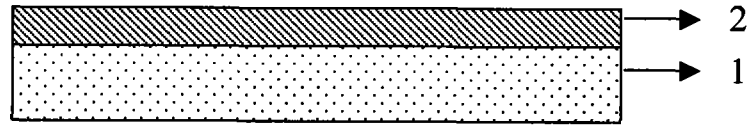
(4) 温敏电阻及其电连接金属层的沉积及图形化：所有金属薄膜包括黏附层 TiW (200Å)、Pt 薄膜 (1200 Å) 和 Au (3000 Å) 连续重叠溅射形成而不中断溅射室的真空；金属剥离 (lift-off) 工艺保留需要的金属层 (如图 1 (d))，再用 KI 溶液 (重量比 KI:I<sub>2</sub>:H<sub>2</sub>O=4:1:40) 腐蚀掉所定义温敏电阻区域的 Au 薄膜，使 TiW/Pt 露出来同时形成 TiW/Pt 温敏电阻和 TiW/Pt/Au 电连接部分；如图 1 (e)

(5) 最外层柔性绝缘保护层：涂覆一薄层 2μm 的低粘度 (1200~1500 mPa·s) PI 预聚体，在热板上 80℃、105℃、140℃分别预烘 5min、4min、4min，接着涂覆约 1.3μm 光刻胶掩膜层，在 100℃热板上预烘 90s，对准曝光，其曝光时间增加为正常曝光时间的 2.5 倍，然后直接在正胶显影液中腐蚀 20s 以露出压焊块 TiW/Pt/Au；如图 1 (f)

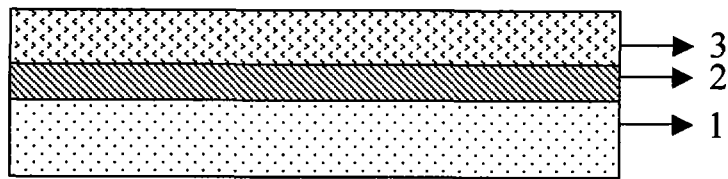
(6) 柔性器件的分离：将载体硅片及其上面制作好的柔性器件放置于 100℃热板上，由于热应力的作用，利用薄刀片和尖嘴镊子将 PI 及器件从载体上分离下来。如图 1 (g)

(7) PI 薄膜的二次固化：将分离后的柔性器件放置与有氮气保护的烘箱中，将分离后的柔性器件放置于有氮气保护的烘箱中，将烘箱从室温逐渐升温到 275℃，然后缓慢降到室温。这样就完成了 8×8 阵列式柔性 MEMS 温度传感器的制作。

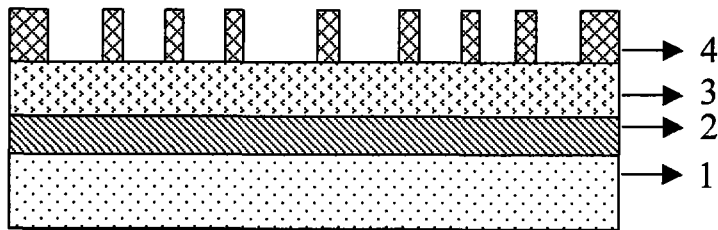
采用本发明所述的方法制作柔性温度传感器阵列只需要三块掩膜版，其制作工艺简单、成品率高、成本低廉。所制作的器件结构轻薄、可挠性好、机械强度高、热响应速度快。柔性温度传感器阵列中的器件单元的性能一致性好 (如图 4)，线性度好 (0.9958)，温敏电阻温度系数达 0.00295/℃，当驱动电流为 10mA 时，其电压灵敏度高达 11.2mV/℃。该柔性温度传感器阵列可贴附在任意复杂几何体表面同时测量温度场的即时分布。通过工艺的优化整合，PI 的完全固化分器件分离前和分离后两个不连续阶段完成，使得 PDMS 及 PI 与传统的 MEMS 工艺相兼容。本发明所述的柔性温度传感器的制作方法对其他特别是以 PI 膜为衬底的柔性 MEMS 技术的发展积累了一些有用经验。



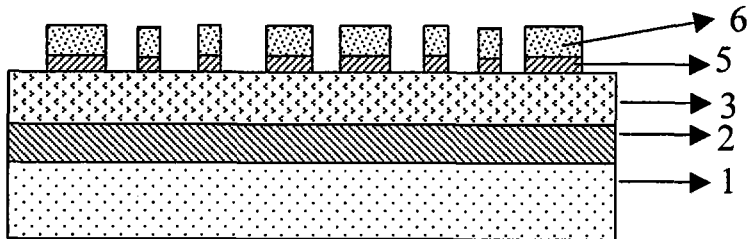
(a)



(b)



(c)



(d)

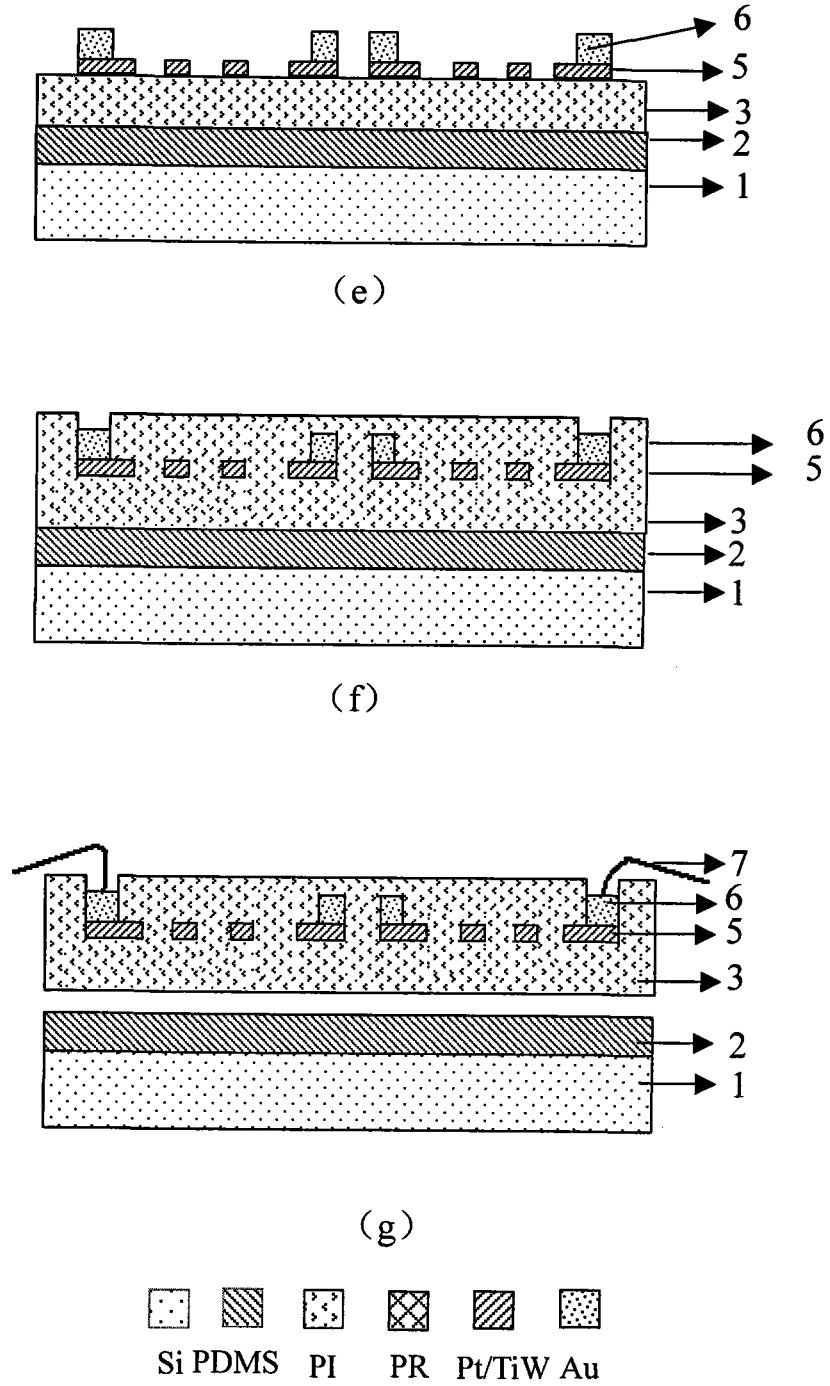
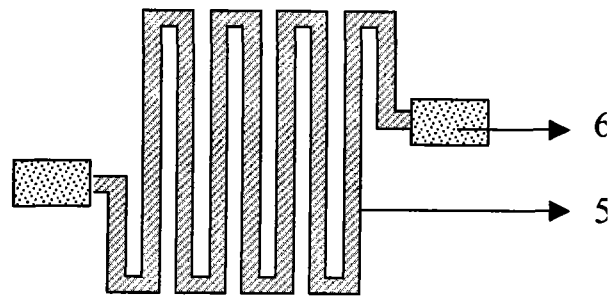
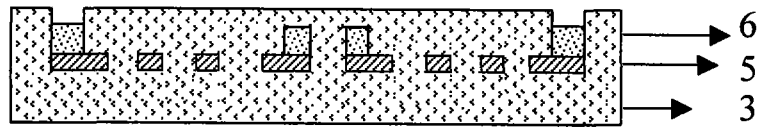


图 1



(a)



(b)

图 2

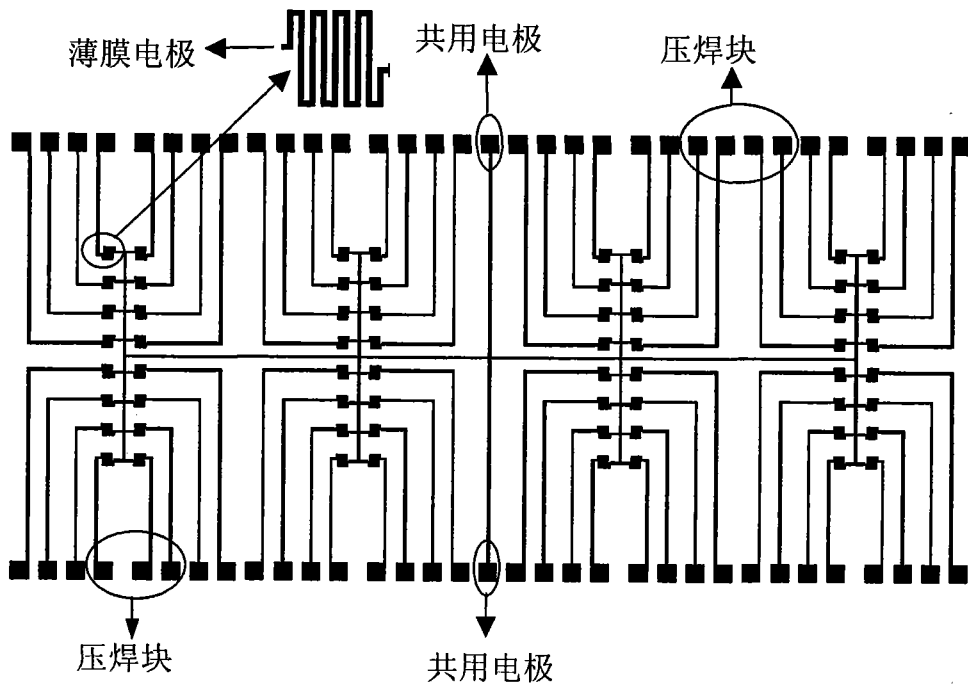


图 3

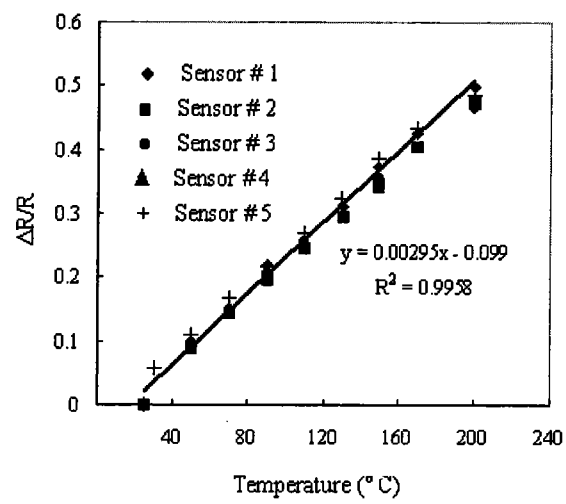


图 4