

# 相变式自检测压力传感器\*

霍明学<sup>†</sup> 汤小川 尹 亮 刘晓为 王喜莲

(哈尔滨工业大学 MEMS 中心, 哈尔滨 150001)

**摘要:** 提出一种新型压力传感器自检测方法——相变热驱动法. 在压力传感器的密封腔中填充相变物质, 利用相变物质气化后所产生的巨大压力实现自检测功能. 通过控制压力腔中相变物质的填充量与加热电阻的加热功率, 可以实现不同量程压力传感器的自检测. 基于相变热驱动法研制了一种单晶硅大量程自检测压力传感器, 传感器为硅-玻璃-硅三层结构, 通过静电键合与热键合技术制备. 测试结果显示, 自检测电压输出为满量程输出的 6.8%, 综合精度高于 2.1%。

**关键词:** 相变热驱动; 自检测; 压力传感器

EEACC: 2575; 8460

中图分类号: TP212.1

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2006)05-0937-07

## 1 引言

压力传感器在军事、航空、航天、医疗、工业生产过程控制等许多领域有着广泛的应用, 这些领域对传感器的可靠性要求极高. 为了提高压力传感器的可靠性, 最主要的方法是在传感器中引入自检测机制, 即在传感器内集成一个执行器, 它以某种固定方式对传感器产生模拟或等效压力信号作用, 利用传感器对该已知信号的反应实现对传感器的检测<sup>[1,2]</sup>. 按执行器驱动机理可将自检测方式分为静电驱动和热驱动两种<sup>[3,4]</sup>.

静电驱动方法可以检测压敏电阻和引线的工作状态, 但是当膜片发生部分破损或绝压结构漏气时, 电桥仍有输出, 无法实现对器件性能的全面检测. 热气驱动法是在传感器绝压腔内封入一定量的气体, 当密封腔内的气体被加热产生膨胀时, 压力敏感膜片发生形变, 实现自检测. 热气驱动法仅适用于小量程压力传感器的自检测. 根据热气驱动的驱动机理还衍生出微机械光致热驱动, 它是基于光能-热能转换的一种驱动策略, 利用微加工的透镜聚集光能作为驱动能量. 这种驱动机制的优点是不需要电源, 并能提供较大的驱动能量, 适用于不易做电源引线连接的情况<sup>[5]</sup>, 但由于工艺问题目前尚未实用化. 为了解决大量程压力传感器自检测问题, 本文提出了一种新型相变热驱动自检测方法.

## 2 相变式自检测压力传感器基本结构与制作工艺

### 2.1 基本结构

相变式热气驱动自检测压力传感器的结构如图 1 所示<sup>[6]</sup>. 结构分三层: 第一层为表面带有单晶硅压敏电阻的硅杯, 压敏电阻按惠斯顿电桥形式连接; 第二层为起隔热作用的玻璃板; 第三层为带有自检测加热电阻的硅衬底, 加热电阻采用扩散工艺制作, 有效解决了加热电阻的引线问题. 传感器经过硅杯与玻璃, 硅杯/玻璃键合体与硅衬底两次键合而成. 玻璃层上有一个气孔, 加热后的气体通过此孔进入硅杯腔体内, 在硅杯敏感膜片上产生自检测信号. 通过控制压力腔中相变物质的填充量与加热电阻的加热功率, 可以实现不同量程压力传感器的自检测.

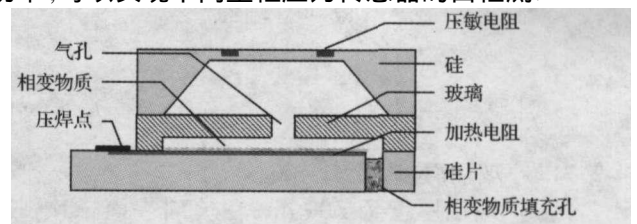


图 1 相变式自检测压力传感器基本结构

Fig. 1 Schematic structure of self-testable pressure sensor based on phase change

\* 国家高技术研究发展计划资助项目 (批准号: 2002AA431200)

<sup>†</sup> 通信作者. Email: huomingxue@hit.edu.cn

2005-08-11 收到, 2005-10-19 定稿

### 2.2 工艺制作

传感器由体硅技术制作而成,完整的工艺流程如图 2 所示.

#### 2.2.1 压力敏感单元制作

n 型 100 硅片,底面用  $\text{Si}_3\text{N}_4$  层掩蔽,通过 KOH 溶液各向腐蚀制作硅杯,敏感膜片厚度为  $150 \sim 200\mu\text{m}$ ,尺寸为  $800\mu\text{m} \times 800\mu\text{m}$ ;正面用  $\text{SiO}_2$  层保护,硼扩制备压敏电阻;正面溅射  $1\mu\text{m}$  厚铝层,制作金属引线.

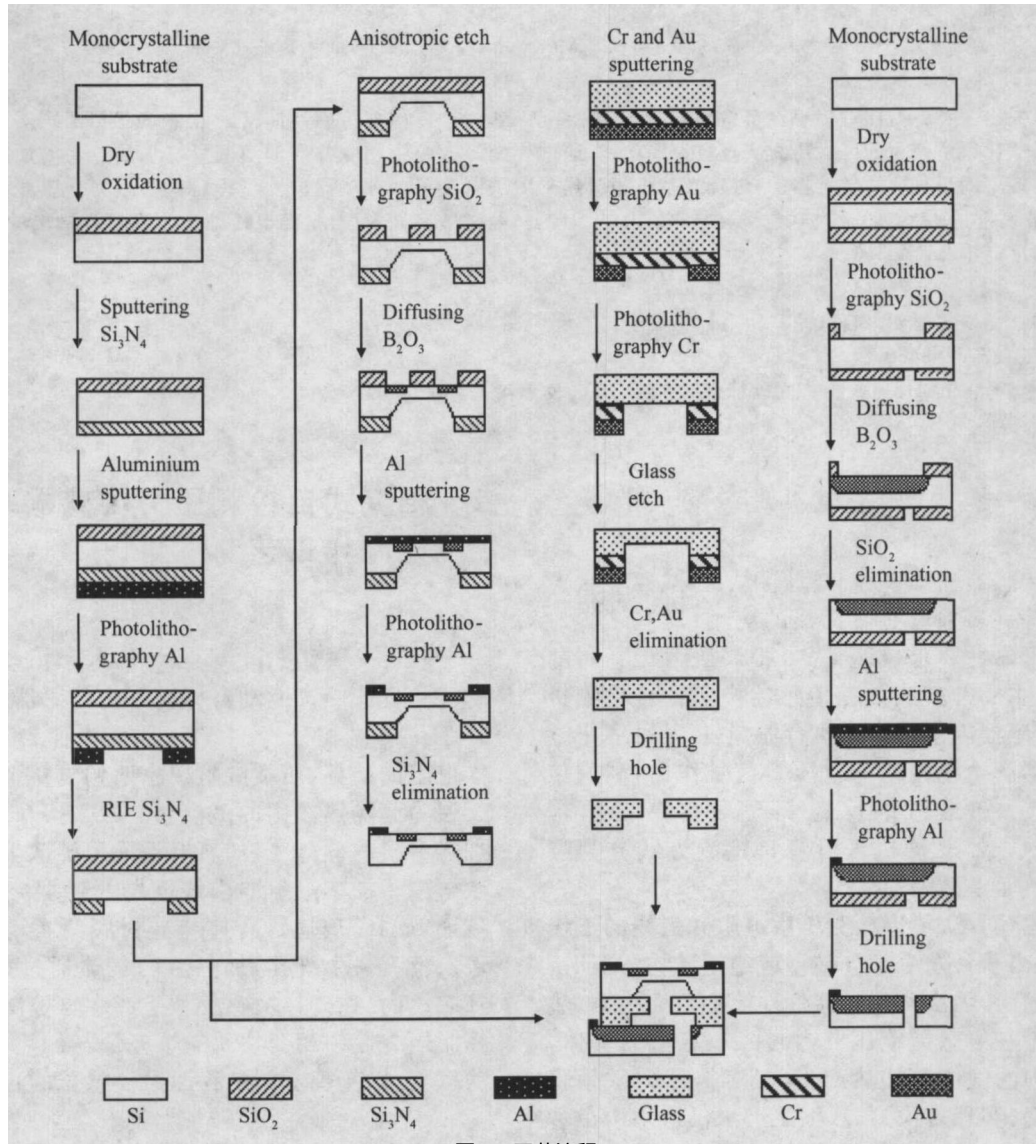


图 2 工艺流程

Fig. 2 Complete fabrication process

#### 2.2.2 玻璃腐蚀

95# 玻璃厚度为  $500\mu\text{m}$ . 在玻璃表面依次溅射 Cr 与 Au 金属掩膜层. 在 1:1 浓度的氢氟酸中腐蚀 1h, 形成  $2\text{mm} \times 2\text{mm} \times 0.2\text{mm}$  的腔体. 通过电化学方法在腔体中心制作一个贯穿玻璃片的通孔, 孔径约为  $500\mu\text{m}$ <sup>[7]</sup>.

#### 2.2.3 热执行器制作

100 硅片, 生长  $400\text{nm}$  二氧化硅作为掩蔽层, 硼扩制备扩散电阻 (即加热电阻), 扩散电阻的方块电阻为  $10 \sim 15 \Omega/\square$ . 去氧化层, 溅射铝, 制作金属引

线.

#### 2.2.4 静电键合

两次硅/玻璃静电键合: 压敏电阻硅杯与玻璃隔层间的键合, 以及两者的键合体与带有加热电阻的硅片衬底间的键合.

### 3 热驱动过程理论分析与计算机模拟

压力传感器相变自检测驱动是一个复杂的传热及相变过程. 从理论上对这一过程进行定量的计算

分析有助于确定传感器所需合适的相变物质的量。通过理论分析并结合 ANSYS 的 FLOTRAN 单元对过程进行模拟分析的方法,可以得出加热器功率与所产生的自驱动压强的关系。这两部分工作对传感器的设计和制作都具有指导意义。

### 3.1 沸腾传热分类

沸腾就其发生方式可分为均匀沸腾和非均匀沸腾。前者是指液体内部没有固定的加热壁面,在较大的液体过热度下,气泡由能量较集中的液体高能分子团的运动与集聚而产生。非均匀沸腾是指气泡在与液体相接触的固体加热面上产生、成长的沸腾过程,所需过热度较低,又常称表面沸腾。在非均匀沸腾的实际应用中,可以按照液体的流动特性分为两大类。第一类为沸腾液体沿一定方向流动(自然循环设备和受迫流动设备),称为流动沸腾,它包含两相流体的流动与沸腾传热的相互影响;第二类是沉浸在原为静止的液体内或为静止液体覆盖的加热面上的沸腾,这种沸腾模式称为池内沸腾或大容器沸腾。容器内液体的流动是由自然对流和气泡的成长、运动所形成的对流而引起的。流体的各种流动和传热现象仅与纯沸腾相联系。本文所讨论的沸腾属于非均匀沸腾中的池内沸腾。

目前,池内沸腾实验研究已经取得了一定的成果。然而,虽然积累了大量实验研究资料,但由于沸腾传热过程过于复杂,迄今为止任何已发表的描述沸腾传热过程的微分方程组和边界条件尚不能获得严格的分析解,无法像处理热传导或辐射传热的某些问题或者像单相流体传热的某些问题那样,根据传热机理及其数学模型得到严格的传热解析式,而主要采用半经验或纯经验的关系式。

基于以上考虑,本文采用近似的计算方法并结合 ANSYS 软件模拟分析,得出相变式自检测压力传感器所需的对应于其量程的合适的相变物质的量,以及在一定量的相变物质条件下,加热器加热功率和自检测驱动压强的关系。

### 3.2 驱动过程的理论计算

计算过程基于以下关系式或假设近似:

(1) 理想气体的状态方程:

$$\frac{PV}{T} = nR \quad (1)$$

(2) 定压比热:

$$dQ = mC_p dT \quad (2)$$

其中  $C_p$  表示定压比热;  $m$  表示质量;  $dQ$  为加热量;  $dT$  为温度增加。

(3) 克劳修斯-克拉珀龙方程:

$$L = dQ = T(V_2 - V_1) \frac{dP}{dT} \quad (3)$$

式中  $L$  表示相变潜热;  $V_1, V_2$  分别为相变前后介质的体积。

(4) 克劳修斯-克拉珀龙方程的不定积分式:

$$\lg p = -A/T + B \quad (4)$$

式中  $A = 2180, B = 10.85$ 。

(5) 1 标准大气压下,液态水在 293 K 时的定压热容为  $0.999 \times 10^3 \text{ cal}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ,在 373 K 下的定压热容为  $1.004 \times 10^3 \text{ cal}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ,二者在数值上都非常接近于  $1 \times 10^3$ 。在下列计算过程中,所有液态水的比热容都近似为 300 K, 1 atm 条件下的比热值为  $4.19 \times 10^3 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 。

(6) 由于所研究的沸腾现象属于表面沸腾,所需过热度远低于均匀沸腾,另外在达到传感器自驱动压强时,相变物质的沸点虽有所升高,但较容易达到,故假设驱动过程相变物质全部气化。

(7) 由于驱动过程膜片的形变对腔体体积的影响极小,整个相变过程假设为等容变化。

(8) 相变物质的相变潜热是温度的函数,但对于本文所研究的液气相变来说,温度对相变潜热的影响较之固-液相变来说要小得多。在此假设液气相变过程中相变潜热不发生变化。

### 3.3 相变物质质量的确定

在 ANSYS 中建立传感器实体模型,通过计算得出压力传感器绝压腔的体积为  $V = 1.2 \text{ mm}^3$ ,这个体积即为以下讨论的相变物质的气化体积。

与热气驱动方式不同,相变式自检测压力传感器是通过加热密封腔中的水或其他相变物质,使其气化后产生足够的蒸汽压而实现自检测功能。在设计传感器结构时,既要考虑加热电阻的加热功率,又要考虑密封腔中相变物质的注入量,本文选用去离子水作为相变物质。由于实际工作时自检测的工作时间较短,通常在 30s 左右,这就要求加热电阻应具有较高的加热功率,同时在满足设计要求的前提下尽可能减少相变物质的注入量,以防止过量的相变物质注入影响传感器的特性。

首先确定自检测信号输出的大小,从测量角度考虑自检测输出不宜过低,而从可靠性角度考虑自检测输出又不宜过高,通常规定为传感器满量程输出的 5% 左右<sup>[8]</sup>。本文所研究的相变式自检测压力传感器量程为 0 ~ 6 MPa,即自检测信号输出应在 0.3 ~ 0.6 MPa 之间。

由公式(1)结合假设(6),(7)可以得到所需相变物质的摩尔量和其全部沸腾时的温度成反比,即:

$$nT = 8.66 \times 10^{-5} \text{ mol} \cdot \text{K} \quad (5)$$

由公式(4)可得在压力为 0.3 MPa 时,水的沸点将由常压下的 373 K 上升至  $T^* = 405.7 \text{ K}$ 。

自驱动过程中,本文所研究的体系(相变物质)

是非常压的.为使水全部沸腾,相变物质温度必须达到 405.7 K.因此,由(5)式可以算出所需的相变物质的量为  $2.135 \times 10^{-7} \text{ mol}$ ,即  $3.84 \mu\text{g}$ .

### 3.4 驱动过程的热量计算

由公式(2)结合假设(5),可得  $3.84 \mu\text{g}$  水在温度由 293 K 上升到 405.7 K 时,吸收的热量为  $Q_1 = 1.813 \times 10^{-3} \text{ J}$ .

由公式(3)可得 1 标准大气压下水的气化热为  $4.067 \times 10^4 \text{ J/mol}$ ,由此再结合假设(8)可得  $3.84 \mu\text{g}$  水在发生液气相变时所需吸收的相变潜热为  $Q_2 = 8.683 \times 10^{-3} \text{ J}$ .

在整个驱动过程中,相变物质水共吸收的热量为  $Q = Q_1 + Q_2 = 1.05 \times 10^{-2} \text{ J}$ .

由于 ANSYS 的 FLORTRAN 单元不能解决具有两相流的物质相变问题,而通过解析法又难以解决复杂的热传导和热交换的矩阵方程.因此,假设绝压腔内的相变物质是单相系,即在整个驱动过程相变物质始终是气相,并且其各项材料属性除密度外都按气态水的材料属性施加.结合上述计算,再通过下面的计算来确定相变物质的等效密度,从而实现这种假设和实际热量转换过程之间的等效.

在吸收上述热量  $Q$  后,质量为  $m^*$  的相变物质温度将由常温 293 K 上升至  $T^*$ ,由公式(2)可得:

$$m^* = \frac{Q}{(T^* - 293) C^*} \quad (6)$$

在(6)式中代入气态水的典型定压比热值(这里利用的是 673 K 下的数值)即可求出  $m^*$  的数值为  $5.036 \times 10^{-8} \text{ kg}$ .再把这个质量  $m^*$  转化为对应于绝压腔体积 ( $1.2 \text{ mm}^3$ ) 的相变物质的密度  $\rho^*$ ,由此得出相变物质的等效密度.通过这种等效,使得模拟中相变物质可以保持流体性质和热学性质不变,并在此前提下,使得整个模拟过程中相变物质吸收的热量和实际水升温并气化所吸收的热量是一致的.相变物质材料属性与模拟涉及的其他两种材料属性一同列于表 1 中.将环境温度 (293 K) 作为初始的温度边界条件,利用 ANSYS 的 FLORTRAN 单元模拟分析来寻找相变物质达到前述求得的相变温度 (405.7 K) 时的加热器加热功率.

表 1 材料属性

Table 1 Material properties

材料	材料属性			材料编号
	密度 $/( \text{kg} \cdot \text{m}^{-3} )$	导热系数 $/( \text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} )$	定压比热 $/( \text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} )$	
气态水	41.97( *)	$2.45 \times 10^{-2}$	$1.85 \times 10^3$	1
硅	$2.33 \times 10^3$	$1.5 \times 10^2$	$0.7 \times 10^3$	2
玻璃	$2.28 \times 10^3$	1.17	$8.82 \times 10^2$	3

### 3.5 驱动过程的温场分布模拟

相变式自检测压力传感器设计的初期阶段是一个探索性的过程,通过模拟仿真并结合实际的加工工艺来确定器件的制作方案,模拟仿真的结果和器件的实际工作情况往往存在一些偏差.模拟仿真对器件的制作具有指导作用,器件的实际工作情况又可以反过来对模拟仿真的边界条件起到校正作用,使仿真结果越来越合理可信.

利用 ANSYS 的 FLOTRAN 分析单元即 FLUID142 单元对传感器进行热分析. FLUID142 单元可用于瞬态或稳态的流体固体热分析,对于流体区域该单元类型在计算中同时求解流体粘滞方程和能量守恒方程;而对于非流体区域,该单元类型只求解能量守恒方程. FLUID142 单元多应用于分析流体运动情况和一定区域流体温度分布情况.

FLUID142 单元可用于模拟流-固混合模型,即设定为 FLUID142 单元类型的区域既可以是流体也可以是固体,具体区分取决于材料号的设置.在采用 FLUID142 单元的流-固混合模型中,系统默认只有材料属性为 1 号材料的区域为流体,对于 1 号材料相应的材料属性为密度、粘性、热导率、比热等流体特性.而其他具有材料号大于 1 的材料属性的区域被系统认为是固体,则其相应的材料属性为密度、杨氏模量、热导率、比热等固体性质.

FLOTRAN 分析单元对网格化的要求很高,本文模拟的流体温度场梯度很大,特别是相变物质区域.这就更需要良好的网格划分,以保证模拟结果的准确性.硅杯、绝压腔体和传感器整体的网格划分如图 3 所示.

利用 FLUID142 单元进行相变式自检测压力传感器的温场和热场的稳态模拟,采用表 1 中的材料属性值,在模拟过程中需要施加的载荷有管座温度边界条件、加热电阻产生焦耳热边界条件、管芯外表面热对流边界条件等.为了使模拟结果更真实地反映传感器的温度分布情况,此次模拟针对网格划分以及边界条件的施加根据以往的经验都有所改进,主要在于:利用工作量较大的人工划分取代以往的智能划分以取得较好的网格密度分布;底座温度作为参考温度施加,而不是作为结点自由度来限定;设置松弛系数和人工粘性以促进收敛;利用 FLDATA31, CAPP 命令对温度、速度、压力进行限制,另外还增大了总体迭代的次数.对自检测压力传感器模型的加热器分别施加不同的热生成率,进行多次模拟仿真.得到的传感器剖面温度分布模拟结果如图 4 所示.

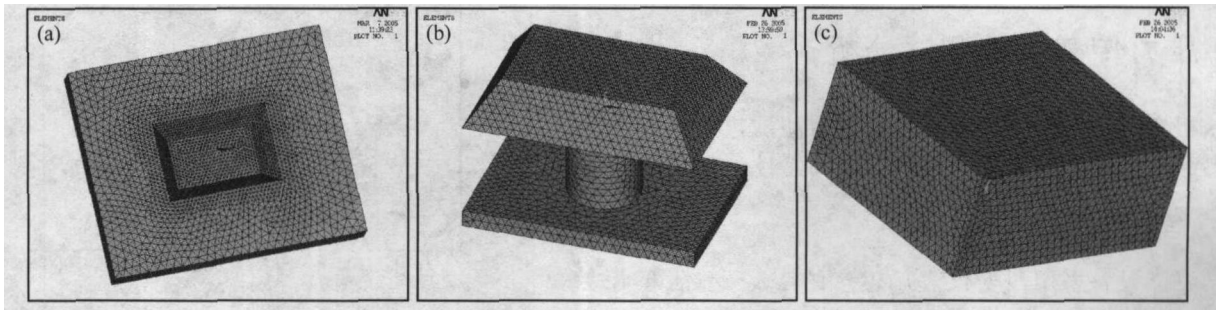


图 3 传感器模型的网格化分 (a) 网格化后的硅杯模型; (b) 网格化后的绝压腔模型; (c) 网格化后的传感器模型

Fig. 3 Meshed model of sensor

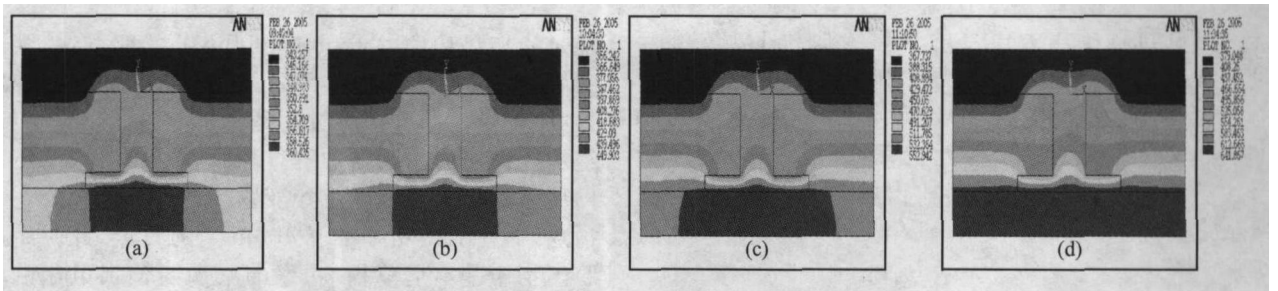


图 4 不同自检测功率下传感器温度分布云图 (a) 400mW; (b) 600mW; (c) 800mW; (d) 1000mW

Fig. 4 Temperature distribution contour of the sensor with different self-test powers (a) 400mW; (b) 600mW; (c) 800mW; (d) 1000mW

从温度分布云图可以看出玻璃层的隔热效果很明显,在 800mW 自检测功率时,底座最高温度和顶部压敏单元最低温度相差达 185 K,有效降低了自检测执行器工作时产生的热量对压敏单元的消极影响.另外,传感器的热量散失主要集中在管芯下部衬底与管座接触之处.在加热器附近,温度梯度最大,远离加热器的部分温度梯度逐渐减小,在硅杯部分温度梯度最小.根据模拟得到的不同驱动功率下绝压腔的平均温度结果,可以看出二者呈线性关系,如图 5 所示.由此还可以得到驱动功率和所产生驱动压强的关系,如图 6 所示.

由图 5 可知,平均温度为 405.7 K 的点对应的加热功率为 780mW,即根据模拟得到的传感器的最佳驱动功率为 780mW 左右.驱动功率为 800mW

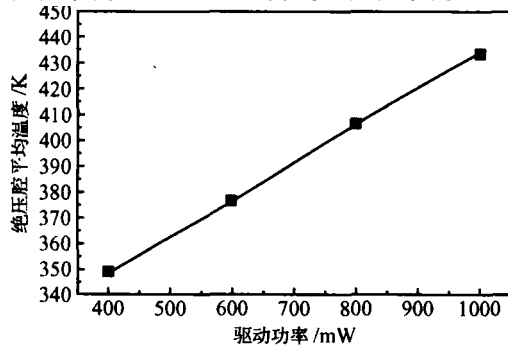


图 5 平均温度和驱动功率的关系

Fig. 5 Relationship between average temperature and power

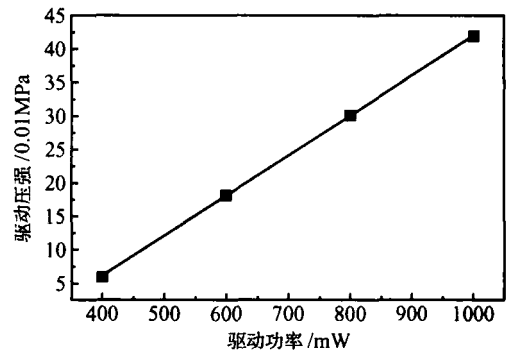


图 6 驱动功率和压强的关系

Fig. 6 Relationship between power and pressure

时,绝压腔纵切面温度分布云图如图 7 所示.由图可以看出在不同高度上绝压腔内的温度分布情况.除压力敏感膜附近的区域外,绝压腔内大部分温度都达到前面求得的相变温度 405.7 K.

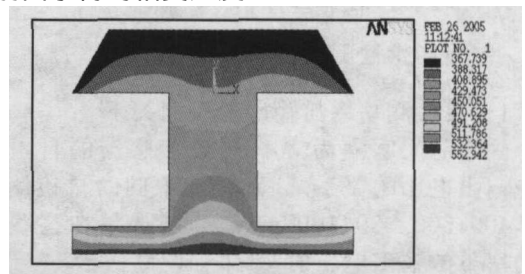


图 7 绝压腔纵切面温度分布云图

Fig. 7 Temperature distribution contour of the chamber's vertical section

## 4 压力传感器的测试分析

相变式热气动自检测压力传感器测试包括压力敏感部分的特性测试和自检测部分的特性测试。

### 4.1 传感器压力特性测试分析

测试设备采用西安仪表厂生产的 YS-6 型活塞式压力计,其测量范围是 0 ~ 40MPa,精度为 0.05%。桥路输出电压读数采用 HP 7 位半数字电压表。

测试过程中压力信号的变化步长为 1MPa,满量程共取 7 个点。按照标准压力传感器测试过程,压力信号由低到高增至 6MPa,再由高到低降至 0MPa,该过程称为一个往返行程,一般测试进行 3 个往返行程。压强与传感器输出的曲线关系如图 8 所示。

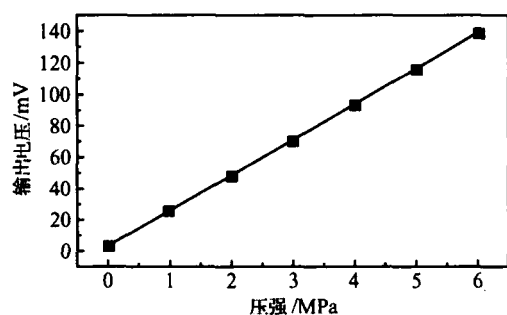


图 8 压强与传感器输出的关系曲线

Fig. 8 Relationship between pressure and output voltage

将测量数据用最小二乘法处理,结果如下:

FS (满量程) = 135.326mV; AA (零位) = 2.985mV; KK (灵敏度) = 22.554mV/MPa; LL (线性度) =  $8.647 \times 10^{-4}$ ; HH (迟滞) =  $6.651 \times 10^{-4}$ ; SS (重复性) =  $1.078 \times 10^{-3}$ ; ZHQ (总精度) =  $2.078 \times 10^{-3}$ 。

结果显示,压力传感器的综合精度高于 2.1%,自检测部分对传感器性能的影响极小。

### 4.2 自检测特性测试分析

#### 4.2.1 自检测功率与输出电压的关系

固定时间间隔为 30s,测量传感器的自检测功率与输出电压的关系。分别施加不同的自检测功率 200,400,600,800,1000mW,分别记录在这些自检测功率下的输出电压值,结果如图 9 所示。

从图 9 可看出,自检测功率与输出电压整体上并不是绝对呈线性关系。与模拟结果存在偏差。其原因是模拟时假设相变物质始终是单相的,而实际情

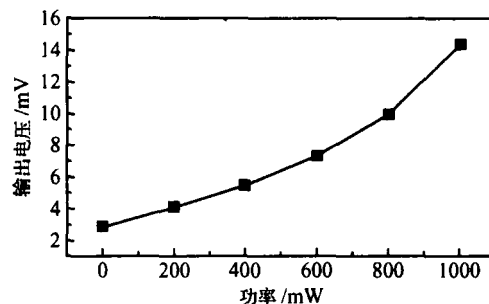


图 9 自检测功率与输出电压的关系

Fig. 9 Relation between power and output voltage

况是当加热功率大于 500 ~ 600mW 的时候,也就是曲线的后半部分,此时相变物质的温度升高到一定程度,开始由部分沸腾过渡到全部沸腾。这个过渡是绝压腔内压力急剧增加的过程。在此过程中,绝压腔内压强的增长速度随着相变物质的全部气化而达到顶点。而在加热功率小于 400mW 的时候,此时绝压腔内物质基本呈单相,功率的增加与输出电压的变化基本呈线性关系。

#### 4.2.2 压力传感器自检测瞬态特性

瞬态特性的测试主要观察在施加自检测激励后,压阻桥路的输出随时间的变化。

对传感器样品施加 800mW 的自检测激励信号,从激励施加一刻起开始记录输出,30s 后撤掉激励信号,利用 X-Y 函数记录仪,测得的曲线如图 10 所示。

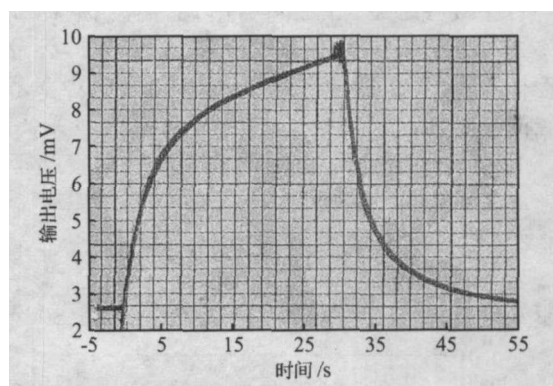


图 10 自检测输出与时间的关系曲线

Fig. 10 Relationship between self-test output voltage and time

测试中发现施加自检测激励后压阻桥路的输出变化很快,自检测响应很迅速。在前 30s 内,输出曲线表现为快速上升;随着加热的继续,水已全部由液相转化为气相。桥路输出达最大值 9.5mV。然后取消自检测激励电压,桥路输出迅速下降,直至恢复到初始值附近。

## 5 结论

为了提高压力传感器的可靠性,将相变热驱动方法成功地用于压力传感器的自检测中.本文所提出的三层结构既能有效减小传感器的结构尺寸,又可以降低自检测温升对传感器性能的影响.测试结果显示,在集成自检测驱动器之后,压力传感器的综合精度仍高于 2.1%,表明传感器静态参数在自检测信号施加前后无明显的改变;自检测电压输出为满量程输出的 6.8%.可见相变热驱动方法完全适用于大量程压力传感器的自检测.

## 参考文献

- [ 1 ] Puers R, De Bruyker D, Cozma A. A novel combined redundant pressure sensor with self-test function. *Sensors and Actuators*, 1997, A60:68
- [ 2 ] Lapadatu A C, De Bruyker D, Jakobsen H, et al. A new concept for a self-testable pressure sensor based on the bimetal effect. *Sensors and Actuators*, 2000, A82:69
- [ 3 ] Cozma A, Puers R. Electrostatic actuation as a self-testing method for silicon pressure sensors. *Sensors and Actuators*, 1997, A60:32
- [ 4 ] De Bruyker D, Cozma A, Puers R. A combined piezoresistive/capacitive pressure sensor with self-test function based on thermal actuation. *Sensors and Actuators*, 1998, A66(4):70
- [ 5 ] Baglio S, Castorina S, Fortuna L, et al. Modeling and design of novel photo-thermo-mechanical microactuators. *Sensors and Actuators*, 2002, A101:185
- [ 6 ] Liu Xiaowei, Huo Mingxue, Wang Xilian, et al. Fabrication process of self-testable pressure sensor based on phase change. China Patent, ZL03132458.4, 2005 [ 刘晓为, 霍明学, 王喜莲, 等. 相变式自检测压力传感器及其制作方法. 中国专利, ZL03132458.4, 2005 ]
- [ 7 ] Liu Xiaowei, Huo Mingxue, Wang Xilian, et al. Drilling hole instrument for glass and silicon wafer based on electrochemistry method. China Patent, ZL03132459.2, 2005 [ 刘晓为, 霍明学, 王喜莲, 等. 电化学法玻璃片硅片穿孔设备. 中国专利, ZL03132459.2, 2005 ]
- [ 8 ] Liu Xiaowei, Huo Mingxue, Wang Xilian, et al. A novel self-testable method for large-scale pressure sensors. DTIP of MEMS & MOEMS Montreux, Switzerland, 2004:203

## Fabrication of Self-Testable Pressure Sensors Based on Phase Change<sup>\*</sup>

Huo Mingxue<sup>†</sup>, Tang Xiaochuan, Yin Liang, Liu Xiaowei, and Wang Xilian

(MEMS Center, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

**Abstract:** A novel self-testable method, thermopneumatic actuation, which is based on phase change, is presented. It can be used in large-scale self-testable pressure sensors. The phase change material (PCM) fills the cavity of the sensor. Applying voltage to the heating resistor, the PCM will be brought to boil. The vapor inside the cavity of the pressure sensor produces a significant pressure on the diaphragm, so a self-test is implemented by means of a thermal actuator based on the phase change. By the magnitude of the PCM that fills the cavity and the power of the heating resistor, the self-testing of the pressure sensors with different measurement range can be achieved. Based on this principle, a novel large-scale self-testable pressure sensor is fabricated. The sensor is built in a silicon-glass-silicon sandwich structure by anodic bonding. The self-testing output of the sensor is 6.8% of the full-scale output, and the accuracy is 2.1%.

**Key words:** thermopneumatic actuation based on phase change; self-test; pressure sensor

EEACC: 2575; 8460

Article ID: 0253-4177 (2006) 05-0937-07

<sup>\*</sup> Project supported by the National High Technology Research and Development Program of China (No. 2002AA431200)

<sup>†</sup> Corresponding author. Email: huomingxue@hit.edu.cn

Received 11 August 2005, revised manuscript received 19 October 2005