

文章编号 1004-924X(2004)06-0598-05

## 微热板式气压传感器结构与热分析

张凤田,唐祯安,高仁<sup>✉</sup>,金仁成,郭文泰,王海霞  
(大连理工大学 电子工程系 微系统研究中心,辽宁 大连 116024)

**摘要:**给出了采用牺牲层技术制作的微热板式气压传感器的加工工艺和工作原理。分析了微热板各层薄膜厚度、微热板下气隙高度、支撑桥尺寸、微热板面积大小对传感器加工、工作性能的影响,并结合实际工艺条件设计了一种采用不同支撑桥尺寸的传感器结构。理论分析了恒温加热方式下微热板各种传热途径随气压的变化关系;用有限元方法模拟了恒流加热方式下气压对传感器温度分布和温度大小的影响。分析结果显示,气压较高时微热板传热以气体导热为主,而气压较低时以支撑桥导热为主;微热板区域温度分布较均匀,温度大小受气压影响较大;设计的传感器测量范围为  $10 \sim 10^5$  Pa,功耗在毫瓦级,且具有尺寸小、热响应快、易与电路集成等优点。

**关键词:**微热板;气压传感器;热分析;有限元

**中图分类号:**TP212 **文献标识码:**A

## Design and thermal analysis of gas pressure sensor with micro-hotplate

ZHANG Feng-tian, TANG Zhen-an, GAO Ren-jing, JIN Ren-cheng, GUO Wen-tai, WANG Hai-xia

(*Research Center of Microsystem Technology, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China*)

**Abstract:** Fabrication process and working principle of thermal gas pressure sensors based on a surface-machining micro-hotplate (MHP) are presented. The effects of dimensions of MHP, gas gap, and supporting beams on fabrication and working performance of the sensor are analyzed, and a new sensor structure with unequal beams is designed. Three heat transfer approaches of MHP including conduction through the supporting beams, thermal radiation, and gas conduction, and their variation with gas pressure under constant temperature operation are investigated in theory. Temperature distribution and its amplitude of the sensor under constant current excitation are simulated with finite element method. The results show that heat loss of MHP is mainly determined by gas conduction in high pressure range, while conduction through the supporting beams dominates in low pressure range. Temperature distribution of MHP is uniform and its amplitude depends on pressure. The designed device can be operated from 10 Pa to  $10^5$  Pa and its power consumption is at the level of milliwatts. It also has other advantages, such as being small in size, fast thermal response, and ease of integration with circuits, etc.

**Key words:** micro-hotplate; gas pressure sensor; thermal analysis; finite element method

收稿日期:2004-09-22;修订日期:2004-11-11.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 90207003)

## 1 引言

真空传感器广泛用于化工、航天、食品加工、半导体加工、电子封装及科学研究等领域。自1906年皮拉尼真空计出现以来<sup>[1]</sup>,加热式气压传感器因结构简单、量程较宽、寿命长等特点一直是各种真空装置中最普遍采用的传感器之一。但这类传感器利用气体导热系数在一定范围内与气体压力成比例的关系进行工作,有热响应慢、受环境影响大、不能用于高真空测量等缺点。随着微电子和微机械加工技术的发展,研制质量小、功耗低、量程宽、热响应快、易与电路集成的微结构加热式气压传感器成为可能,并得到了重视<sup>[2-4]</sup>。

微结构加热式气压传感器有微悬臂<sup>[2]</sup>、微桥<sup>[3]</sup>及微热板<sup>[4]</sup>等多种结构,其中微热板由于加热效率高运用更为广泛。本文介绍微热板式气压传感器的加工工艺和工作原理;设计适合用表面牺牲层技术实现的传感器结构,并分析气压对其传热特性的影响。

## 2 微热板式气压传感器加工工艺及工作原理

微热板可用体微加工技术<sup>[5]</sup>或表面牺牲层技术<sup>[6]</sup>获得,其中采用表面牺牲层技术制作的微热板式气压传感器通常更容易获得较宽的量程,与集成电路工艺有更好兼容性,所以本文主要研究采用牺牲层技术制作的微热板式气压传感器,结构如图1所示,图中微热板通过四个支撑桥与硅框相连。传感器制备过程简述如下:在热氧化硅片上淀积多晶硅牺牲层;淀积  $\text{SiO}_2\text{-Si}_3\text{N}_4\text{-SiO}_2$  介质层;在介质层上制作蛇形电阻;淀积钝化层后开孔去掉牺牲层得到悬空微热板结构。蛇形电阻有较高的电阻率和电阻温度系数,既作为加热电阻把微热板加热到一定温度,又可作为温敏元件检测微热板的温度变化。

在工作范围内,微热板周围气体导热系数与气体压力成正比。当气压增加时,气体导热系数增加,微热板通过气体导热消耗的加热功率增加。这样,若加热功率保持恒定,微热板温度会降低;若要微热板温度保持恒定,必须增加加热功率。所以,通过检测加热电阻上相应电信号的变化可

以测量气体的压力。

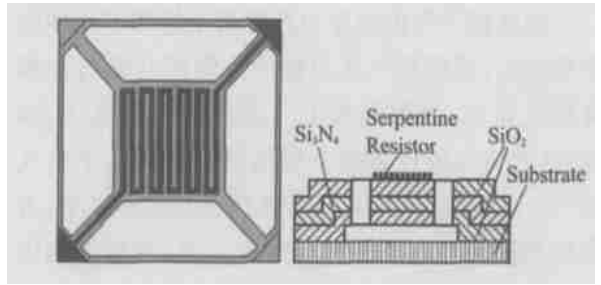


图1 传感器的结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of thermal gas pressure micro sensor

## 3 结构设计

对于采用牺牲层技术加工的微热板式气压传感器,结构上要满足以下要求:(1)微热板温度分布均匀,各支撑桥温度分布一致,以减少热应力;(2)悬空结构要有足够强度,避免在热应力和加工过程中附加力作用下发生断裂;(3)在湿法腐蚀牺牲层和清洗过程中,液体表面张力引起微热板弯曲,甚至与衬底发生接触,若弹性恢复力太小,会出现粘附现象;同时,工作时热变形也可能使微热板与衬底接触,导致传感器不能正确工作,所以还要保证结构有足够的刚度。这些需要对微热板各层薄膜厚度、气隙大小、微热板面积、支撑桥尺寸等进行合理设计。

### 3.1 薄膜厚度

薄膜本征应力常常是影响微热板可靠性的重要因素,其大小与材料和制备工艺有关,优化微热板中  $\text{SiO}_2\text{-Si}_3\text{N}_4\text{-SiO}_2$  各层薄膜的厚度可以减少总的本征应力。微热板总的本征应力可用下面表达式计算:

$$\sigma = (\sigma_1 d_1 + \sigma_2 d_2 + \sigma_3 d_3) / (d_1 + d_2 + d_3), \quad (1)$$

式中,  $d_i$  和  $\sigma_i$  ( $i = 1, 2, 3$ ) 分别是第一层  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{SiN}$ 、第二层  $\text{SiO}_2$  厚度和本征应力大小。一般  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{SiN}$  本征应力分别为  $-0.27 \text{ GPa}$ 、 $1.2 \text{ GPa}$ <sup>[7]</sup>,选取不同  $d_i$  ( $i = 1, 2, 3$ ) 组合,可以把  $\sigma$  控制在  $-0.1 \sim 0.1 \text{ GPa}$  范围内。

薄膜厚度不仅影响本征应力大小,也影响微热板强度、刚度,薄膜越厚尤其是弹性模量较大的氮化硅越厚,微热板强度、刚度越大。综合考虑可以取  $d_i$  ( $i = 1, 2, 3$ ) 分别为  $0.9 \mu\text{m}$ 、 $0.35 \mu\text{m}$ 、 $0.8 \mu\text{m}$ 。

### 3.2 气隙高度

微热板下气隙高度对传感器结构和工作性能影响较大,传感器气压测试的上限值几乎与气隙高度成反比,当微热板下气隙高度小到  $0.3 \mu\text{m}$  时,加热式气压传感器上限值可以达到几个大气压<sup>[8]</sup>。气隙高度越小,要求微热板的变形越小,否则微热板有可能与基底粘附在一起,严重影响传感器的灵敏度。并且,气隙高度小到一定程度后,热辐射耗能加剧,也可能降低传感器的工作性能<sup>[9]</sup>。

### 3.3 微热板面积和支撑桥尺寸

若保持微热板温度不变,增大微热板面积,气体导热消耗功率增加,可以提高传感器灵敏度。但面积越大,采用牺牲层技术加工时越易出现粘附现象,且牺牲层腐蚀时间越长。

支撑桥尺寸一般要求长而窄,以减少其消耗的加热功率和增大传感器的低气压测量范围,但是支撑桥越长抵抗变形能力越差,形成悬空结构越困难。支撑桥尺寸确定应考虑气隙高度和工作区面积的大小,工作区面积相对较大时,为满足加工和强度要求,支撑桥长宽比不宜太大。

综合考虑以上因素,并结合实际工艺条件,设计了如图 2 所示的传感器结构。微热板面积为  $93 \times 93 \mu\text{m}^2$ ,微热板下气隙高度为  $0.5 \mu\text{m}$ ,加热电阻宽  $5 \mu\text{m}$ ,间距为  $4 \mu\text{m}$ ,长桥和短桥长度分别为  $90 \mu\text{m}$ 、 $60 \mu\text{m}$ ,宽度分别为  $15 \mu\text{m}$ 、 $8 \mu\text{m}$ 。采用不同的桥长,不仅可以提高微热板加热效率,也保证了传感器足够的强度和刚度。

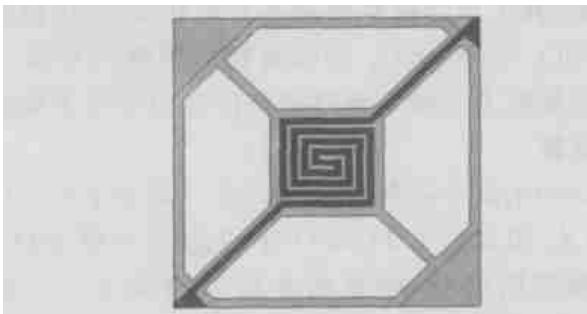


图 2 实际设计的传感器示意图  
Fig. 2 Schematic diagram of designed sensor

## 4 热分析

从工作原理可见,加热式气压传感器的性能

与微热板的传热有很大的关系,所以有必要对微热板的传热特性进行分析。

微热板主要通过支撑桥导热( $Q_s$ )、微热板下气体导热( $Q_g$ )、热辐射( $Q_r$ )三种途径消耗加热电阻产生的热量( $Q_T$ ),所以有:

$$Q_T = Q_s + Q_g + Q_r, \quad (2)$$

### 4.1 支撑桥导热

由于硅材料导热性能较好,可以假设硅框、硅衬底的温度均为环境温度  $T_a$ 。于是,4 个支撑桥的导热量可以表示如下:

$$Q_s = {}_1A_{b_1}(T_s - T_a)/L_1 + {}_2A_{b_2}(T_s - T_a)/L_2, \quad (3)$$

式中,  $T_s$  为微热板平均温度,  ${}_1$ 、 ${}_2$  与  $A_{b_1}$ 、 $A_{b_2}$  分别为长桥、短桥的等效导热系数和横截面积;  $L_1$ 、 $L_2$  分别为长、短桥的长度。

### 4.2 热辐射

不考虑热辐射的微尺度效应,热辐射消耗的加热功率可由斯蒂芬-玻尔兹曼定律确定:

$$Q_r = 2 {}_bA_s(T_s^4 - T_a^4), \quad (4)$$

式中,  ${}_b$  为斯蒂芬-玻尔兹曼常数,  ${}_s$  为微热板黑度,方程右边乘上系数 2 是因为微热板通过上下表面辐射热能。

### 4.3 气体热传导

微热板下气体导热与气压大小有关,可以表示为<sup>[10]</sup>:

$$Q_g = K_g^{(0)} \frac{PP_{tr}}{P + P_{tr}} (T_s - T_a), \quad (5)$$

$$K_g^{(0)} = \frac{1}{2} {}_0A_s \left( \frac{273.2}{T_a} \right)^{1/2}, \quad (6)$$

$${}_0 = \frac{0.01468}{M^{1/2}} \times \frac{+1}{-1}. \quad (7)$$

其中,  $A_s$  为微热板面积;  ${}_g$  为气体调节系数;  ${}_0$  为 273 K 时自由分子热导率;  $P$  为气体压力;  $P_{tr}$  为气体导热从自由分子流态向粘滞态过渡的气压值,其大小与微热板下气隙高度成反比<sup>[11]</sup>;  $M$  为气体分子质量(单位为  $g$ );  ${}_g$  为气体的定压比热与定容比热的比值。

若保持微热板平均温度  $T_s$  不变(即传感器采用恒温加热方式),且大小为 350 K,对于图 2 所示结构,由式(2)-(5)计算各种传热途径的热损耗随气压变化的关系曲线如图 3 所示。其中,  ${}_1$ 、 ${}_2$  分别为  $7.739 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 、 $6.15 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ;  ${}_b$  为  $0.9$ ;  ${}_0$  对于空气取  $1.23 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{Pa})$ <sup>[10]</sup>;

$P_{ir}$  为  $5 \times 10^4$  Pa; 取 0.8;  $T_a$  为 300 K。

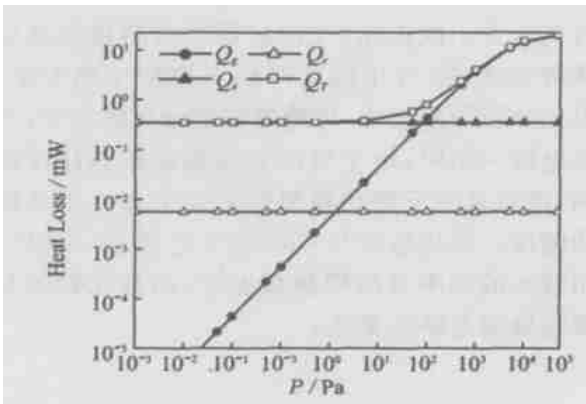


图 3 热损耗随气压的变化关系

Fig. 3 Calculated heat loss of various thermal conductances of the device

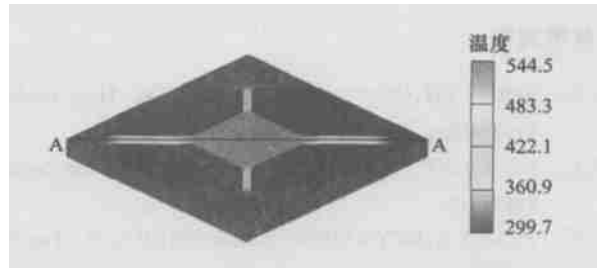
从图 3 可见,在恒温加热方式下,支撑桥导热和热辐射消耗的加热功率不受气压影响,气体导热在  $5 \times 10^4$  Pa 以下与气压成正比,而超过该值基本上保持不变。这是因为支撑桥的导热取决于桥长、桥横截面积、微热板温度,热辐射也主要由微热板面积和温度决定,与气压没有直接关系。对于气体导热,气压较低时,气体分子平均自由程大于微热板下气隙高度,气体导热系数与气压大小成正比,而当气压超过一定值后,气体导热系数不再受气压影响,所以呈现图 3 中的变化趋势。

另外,图 3 显示在气压较低时微热板传热以支撑桥导热为主,而气压较高时以气体导热为主,由于温升只有 50 K,热辐射在整个气压范围都很小。微热板总热损耗在毫瓦级,在  $10 \sim 10^5$  Pa 范围内随气压有明显变化。传感器的测量上限主要由  $P_{ir}$  决定,所以减少微热板下气隙高度可以扩大传感器高压测量范围;而要减少下限值,扩大传感器低气压测量范围需减少热辐射和支撑桥传热损耗的热量,增加气体导热所占的比例。

#### 4.4 用有限元法分析传感器的传热特性

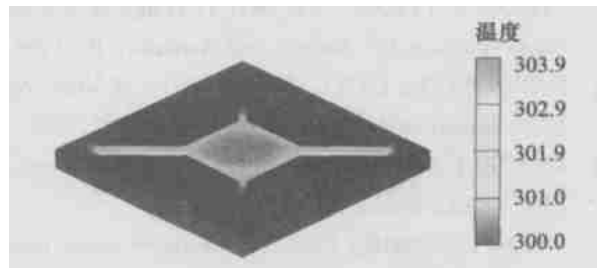
用 CoventorWare 软件计算图 2 所示传感器的三维温度分布,结果如图 4 所示。计算时,给加热电阻通一恒定电流,大小为 1 mA,约束基底底面温度为 300 K,其他各面为自由边界条件,微热板表面黑度取 0.8;加热电阻薄膜厚度为  $0.35 \mu\text{m}$ ,电阻率为  $3.5 \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{m}$ ,大气压下气体导热系数为  $0.024 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ ,微热板区域二氧化硅、氮化硅厚度分别为  $1.7 \mu\text{m}$ 、 $0.35 \mu\text{m}$ 。由图可见,在加热电流恒定的条件下,传感器温度分布受

气压影响较大,绝对真空时微热板最高温度相对与硅框升高了约 245 K,而大气压条件下只升高了约 4 K,这是因为大气压下气体导热系数较大,加热电阻产生的热量大部分通过气体导热散失掉,用来增加微热板内能的热量相对较少。图 5 显示了 A-A 线(见图 4)上的温度分布,可见,最高温度出现在微热板的中间位置,微热板区域温度分布较均匀,沿支撑桥逐渐降低;硅框温度与基底温度基本相同,没有明显的温升,这有利于把传感器和处理电路集成在同一芯片。



(a) 绝对真空下传感器温度分布

(a) Temperature distribution of the device under absolute vacuum



(b) 大气压下传感器温度分布

(b) Temperature distribution of the device under atmosphere condition

图 4 传感器温度分布

Fig. 4 Temperature distribution of the device

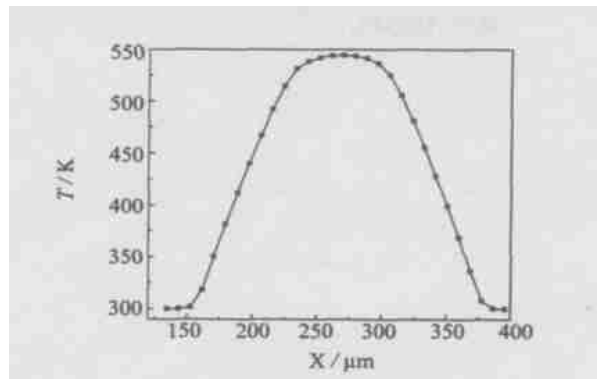


图 5 A-A 线上的温度分布曲线

Fig. 5 Temperature distribution along line A-A

## 5 结 论

通过对微热板式气压传感器设计方法的探讨,设计了满足  $2 \sim 3 \mu\text{m}$  CMOS 工艺要求,具有优良力学、热学特性的传感器结构。微热板传热特性的理论分析表明,在恒温加热方式下,支撑桥导热和热辐射不受气压影响,气体导热在一定范围

内与气压大小成正比;气压较高时微热板传热以气体导热为主,气压较低时以支撑桥导热为主。有限元分析结果显示,传感器温度分布较均匀;当加热电流一定时,由于气压对传感器传热特性的影响,绝对真空下微热板温度远大于大气压条件下的温度。该传感器与 CMOS 工艺兼容,不仅可以用较小的功率升高微热板温度,而且比较容易实现与处理电路的集成。

### 参考文献:

- [1] SHIE J SH, CHOU B C S, CHEN Y M. High performance Pirani vacuum gauge[J]. *Journal of Vacuum Science Technology A*, 1995, 13(6):2972-2979.
- [2] BERLICKI T M. Thermal vacuum sensor with compensation of heat transfer[J]. *Sensors and Actuators A*, 2001, 93:27-32.
- [3] PUERS R, REYNJTENS S, BRUYKER D D. The NanoPirani: an extremely miniaturized pressure sensor fabricated by focused ion beam rapid prototyping[J]. *Sensor and Actuators A*, 2002, 97-98:208-214.
- [4] MA Y, ROBINSON A M, LAWSON R P W, et al. CMOS micromachined low power microlamp vacuum sensor[J]. *IEEE*, 2002:971-975.
- [5] SHENGL Y, TANG ZH, WU J, et al. A low-power CMOS compatible integrated gas sensor using maskless tin oxide sputting[J]. *Sensors and Actuators B*, 1998, 49:81-87.
- [6] CHAN P C H, YAN G ZH, SHENGL Y, et al. An integrated gas sensor technology using surface micro-machining[J]. *Sensors and Actuators B*, 2002, 82:277-283.
- [7] DEMIRCI T, GUNEY D, BOZKURT A. Electro-thermal simulations and modeling of micromachined gas sensor[J]. *IEEE*, 2002:99-102.
- [8] CHOU C S, SHIE J SH. An innovative pirani pressure sensor[J]. *IEEE*, 1997:1465-1468.
- [9] 韩茂华, 梁新刚. 热辐射的微尺度效应对微结构气敏传感器的影响[J]. *上海理工大学学报*, 2003, 25(special):45-47.
- [10] WENG P K, SHIE J SH. Micro-pirani vacuum gauge[J]. *Review of Scientific Instruments*. 1994, 65(增):492-499. (in Chinese)

作者简介:张凤田(1976-),男,重庆万州人,大连理工大学电子工程系在读博士生,主要研究方向为加热式微传感器;  
唐祯安(1955-),男,辽宁大连人,大连理工大学电子工程系教授,博士生导师,主要研究方向为微电子、纳米电子、MEMS。