

文章编号 1004-924X(2008)07-1253-05

# 恒温式微热板电阻真空传感器

张凤田<sup>1,2</sup>, 唐祯安<sup>2</sup>, 余 隽<sup>2</sup>, 汪家奇<sup>2</sup>

(1. 中国工程物理研究院 电子工程研究所, 四川 绵阳 621900;

2. 大连理工大学 电子工程系, 辽宁 大连 116024)

**摘要:**研究了微热板的传热特性,从理论上分析了恒温模式下工作温度和结构尺寸对微热板电阻真空传感器工作特性的影响。设计了一种边长为93  $\mu\text{m}$ 、四臂支撑的方形微热板结构的电阻真空传感器,支撑桥长65  $\mu\text{m}$ 、宽21  $\mu\text{m}$ ,微热板与衬底之间的气隙高度为0.5  $\mu\text{m}$ ;采用表面微机械加工技术成功实现了该传感器的加工。用恒温电路进行测试的结果显示,该微热板真空传感器气压测量范围约 $2\sim 10^5$  Pa,且响应特性与理论计算结果相符。

**关键词:**微热板; 电阻真空传感器; 恒温

**中图分类号:** TB772.2; TN107 **文献标识码:** A

## Constant temperature thermal vacuum sensor based on micro-hotplate

ZHANG Feng-tian<sup>1,2</sup>, TANG Zhen-an<sup>2</sup>, YU Jun<sup>2</sup>, WANG Jia-qi<sup>2</sup>

(1. *Electronic Engineering Institute, Chinese Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China;*

2. *Department of Electronic Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China*)

**Abstract:** To study the characteristics of Micro-hotplate(MHP)based vacuum sensor at constant temperature working mode, the influences of working temperature and dimensions on the working characteristics of MHP-based thermal vacuum sensor at constant temperature was analyzed based on the thermal analysis of MHP. An MHP-based thermal vacuum sensor was designed in the supporting beams of 65  $\mu\text{m}$  long and 21  $\mu\text{m}$  wide, and the gas gap below micro-hotplate of 0.5  $\mu\text{m}$ . The micro sensor was fabricated successfully with surface micromachining technology. The testing results show that the fabricated vacuum sensor is sensitive in pressure range of  $2\sim 10^5$  Pa and the sensor response characteristics are consistent with the theoretical calculated results.

**Key words:** Micro-hotplate(MHP); thermal vacuum sensor; constant temperature

## 1 引言

微电子与微机械加工技术的迅速发展<sup>[1-2]</sup>,使微型化成为真空传感器的一个重要研究方向<sup>[3-4]</sup>。

微型化可以减小真空传感器的体积,便于实现一体化与集成化<sup>[5]</sup>,所以,近些年各国研究者采用微机械技术在微型真空传感器方面开展了大量的研究工作。其中,利用变形原理的压阻式和电容式微型真空传感器测量下限、灵敏度受到膜片尺寸

收稿日期:2007-11-07;修订日期:2008-01-08.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 90207003; No. 90607003)

与机械强度的限制,且往往需要真空参考腔,封装成本较高<sup>[6]</sup>。基于气体热传导原理的电阻式微型真空传感器结构简单,工作时不需要真空参考腔与变形元件,具有寿命长、量程宽、成本低等优点,与广泛运用于各种真空装置中的传统电阻真空传感器相比,尺寸小、功耗低、热响应速度快,有望拓宽电阻式传感器在便携式气压测试仪、微电子封装、微机电系统等更多领域中的运用<sup>[7]</sup>,因此,近些年得到许多研究者的关注。

目前,采用体微机械加工或表面微机械加工技术,出现了微悬臂梁、微桥、微热板等多种微结构的电阻真空传感器,它们通过恒电流、恒电压或恒温等测试电路进行真空度测量,其中,恒温工作模式下的微热板电阻真空传感器具有量程宽、灵敏度高优点。本文在微热板传热分析的基础上理论分析了恒温模式下微热板真空传感器的工作特性,设计和采用表面微机械加工技术加工了一种微热板结构的电阻真空传感器,并在真空系统中用恒温测试电路对该传感器进行了测试。

## 2 结构与工作原理

图 1 是微热板电阻真空传感器的结构示意图。微热板中间方形板通过四个角落的支撑桥支撑,悬空于衬底之上,不仅提高了绝热性,而且可以形成电阻真空传感器中需要的微小气体间隙。微热板由二氧化硅/氮化硅/二氧化硅复合介质层构成,以减小悬空结构的残余应力,保证其足够的机械强度与刚度。蛇形电阻采用正温度系数的掺杂多晶硅,夹在复合介质层中间,既作为加热电阻使微热板工作在一定温度,又可作为温敏元件检测微热板的温度变化。微热板中间方形区面积为

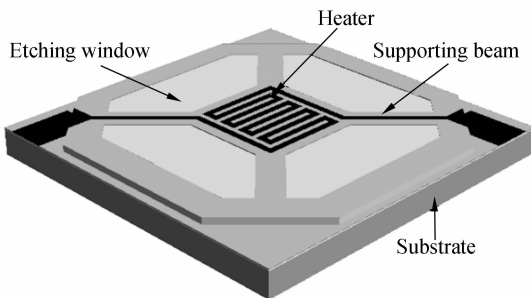


图 1 微热板电阻真空传感器的结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of MHP-based thermal vacuum sensor

$93\ \mu\text{m} \times 93\ \mu\text{m}$ ,多晶硅蛇形电阻宽  $5\ \mu\text{m}$ 、厚度  $0.35\ \mu\text{m}$ ,微热板下气隙高度  $0.5\ \mu\text{m}$ 。

电阻真空传感器是利用气体热导率随气压变化的关系进行工作的。在恒温模式下,气压变化时,微热板下面气体层导热散失的热量也发生变化,为维持微热板温度恒定需要的加热功率必然发生变化,通过检测微热板加热功率的变化即可实现真空测量。

## 3 理论分析

微热板悬空在硅衬底上,当加热电阻通电后,微热板工作区温度升高,加热电阻产生的热量  $Q_z$  主要通过微热板下的气体热传导 ( $Q_g$ )、支撑桥导热 ( $Q_s$ )、微热板周围气体对流换热 ( $Q_c$ )、热辐射 ( $Q_r$ ) 四种传热形式散失。由于微热板面积小和工作温度较低,可忽略气体对流换热、热辐射,由能量守恒定律,式(1)成立:

$$P = I^2 \times R_{a0} [1 + \alpha(T_s - T_a)] = Q_s + Q_g, \quad (1)$$

式中,  $I$  为加热电阻中的加热电流;  $T_s$  为微热板中间加热区的平均温度;  $T_a$  为衬底温度;  $R_{a0}$  是温度为  $T_a$  时微热板中间区域加热电阻  $R_s$  的初值。

假设微热板中间方形区域温度分布均匀,根据气体动力学理论,在整个气压范围内,通过气体导热散失的热量  $Q_g$  可由式(2)给出<sup>[8]</sup>:

$$Q_g = \frac{\phi}{2 - \phi} \Delta_0 \left( \frac{273.2}{T_a} \right)^{1/2} A_s \frac{P P_{tr}}{P + P_{tr}} (T_s - T_a) = G_g (T_s - T_a). \quad (2)$$

式中,  $\Delta_0$  为自由分子热传导系数;  $\phi$  为气体的表面适应系数;  $A_s$  为微热板面积;  $P_{tr}$  是使气体导热从自由分子流向连续介质流过渡的过渡气压值;  $G_g$  为气体热导。

根据傅里叶定律和能量守恒定律可以得到支撑桥的一维稳态导热方程<sup>[9]</sup>:

$$\lambda \frac{d^2 T(x)}{dx^2} + \frac{I^2 \rho_a}{A_b A_b} [1 + \alpha \cdot (T(x) - T_a)] - \frac{G_g}{A_s t_b} \cdot [T(x) - T_a] = 0. \quad (3)$$

$$T(x) \big|_{x=0} = T_a. \quad (4)$$

$$T(x) \big|_{x=L} = T_s. \quad (5)$$

式(3)中左边第一项对应沿支撑桥长度方向  $x$  的净得热量;第二项对应支撑桥内部加热电阻产生的热量;第三项对应支撑桥下气体热传导散

失的热量;  $A_n$  为支撑桥上加热电阻横截面积;  $A_b$  为支撑桥横截面积;  $A_s$  为微热板中间工作区面积;  $t_b$  为微热板厚度;  $\rho_a$  为加热电阻在室温下的电阻率;  $\alpha$  为加热电阻的温度系数;  $\lambda$  为支撑桥的等效热导率; 式(5)中  $L$  为支撑桥的长度。

求解式(3)得到支撑桥上的温度分布函数  $T(x)$ , 可以计算微热板中间区域通过支撑桥散失的热量:

$$Q_s = \sum_{j=1}^n \kappa_j \frac{dT(x_j)}{dx_j} \Big|_{x_j=L_j}, \quad (6)$$

式中,  $n$  表示支撑桥的数量;  $\kappa_j = \lambda_j \times A_{bj}$ ,  $\lambda_j$  为各支撑桥内介质薄膜的等效热导率、 $A_{bj}$  为各支撑桥的横截面积;  $T(x_j)$  为各支撑桥上的温度分布函数。

将式(2)、(6)代入式(1)得到:

$$I^2 R_{a0} [1 + \alpha(T_s - T_a)] - [G_g(T_s - T_a) + \sum_{j=1}^n \kappa_j \frac{dT(x_j)}{dx_j} \Big|_{x_j=L_j}] = 0, \quad (7)$$

由式(3)和式(7)可知, 直接求解恒温条件下加热电流  $I$  随气压变化的表达式比较困难。但是若通过编制程序, 利用试错法, 可以得到温度  $T_s$  恒定时加热电流  $I$  随气压变化的数值解, 也就是当测试环境中气压为  $P'$  时, 在一定电流范围内按照合理的间距取电流值  $I'$ , 若由式(3)和式(7)计算出来的微热板中间区温度  $T_s'$  与设定的微热板工作温度  $T_s$  的误差在允许范围内, 即认为该电流  $I'$  就是气压为  $P'$  时, 为维持微热板工作温度  $T_s$  恒定加热电阻需要通入的电流。通过在不同气压条件下尝试电流值, 就能得到恒温条件下不同气压对应的电流值, 进而可以计算恒温条件下各种传热途径散失的热量和传感器输出信号随气压的变化关系。

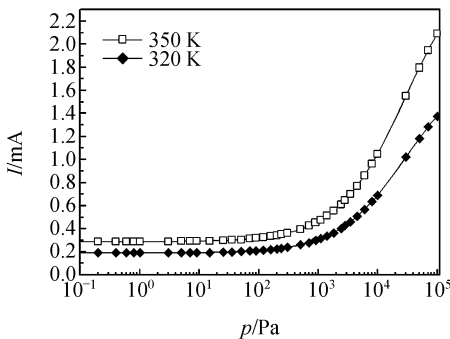


图 2 加热电流随气压的变化关系

Fig. 2 Relation between heating currents and gas pressures

微热板真空传感器的加热功率在几百毫瓦以内, 所以本文选择电流  $I$  的试错范围为 0.1~20 mA, 由试错电流  $I$  计算出的微热板中间温度  $T_s'$  与设定温度  $T_s$  的误差允许值设定为 0.001 K。设定微热板中间区温度恒为 320 K 和 350 K, 计算得到加热电流随气压的变化关系曲线如图 2 所示, 可见随着气压增加, 加热电流也需要相应增加, 才能够保持微热板中间区温度恒定, 同时中间区温度越高, 在同一气压大小需要的加热电流越大。

图 3 是恒温条件下微热板中间区域通过各种传热形式散失的热量随气压的变化关系。可见, 通过气体热传导散失的热量随气压增加而增加, 这是因为温度恒定时气体导热与热导率成正比, 而气体热导率在自由分子流与过渡流范围内随气压增加而增加; 气压变化虽然对支撑桥热传导散失的热量也略有影响, 但影响程度远远小于气体导热散失的热量, 支撑桥热传导散失的热量随气压变化主要还是由于支撑桥上的温度分布随气压变化引起的; 另外, 由于温度恒定, 热辐射散失的热量不随气压变化, 同时恒温模式工作温度始终较低, 所以热辐射散失的热量很小, 可以忽略。

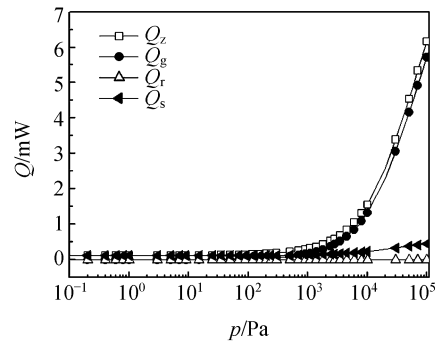


图 3 各种传热形式散失的热量随气压的变化关系

Fig. 3 Relation between heat dissipations through various approaches of heat transfer and gas pressures

根据微热板加热电阻大小, 以及图 2 中不同气压条件下维持温度恒定需要的加热电流  $I$  大小, 可以得到传感器的输出电压随气压的变化关系曲线如图 4 所示。可见, 恒温工作模式传感器输出电压变化范围较大, 当恒定温度为 320 K 时, 在  $1 \sim 10^5$  Pa, 输出电压变化约 4.5 V, 当恒定温度为 350 K 时, 输出电压变化约 7.3 V, 所以工作

温度越高,传感器灵敏度越高。

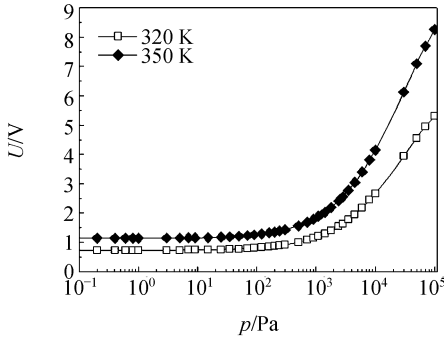


图 4 传感器输出电压随气压变化曲线

Fig. 4 Sensor outputs versus gas pressures

图 5 显示了温度恒为 320 K 时支撑桥长度对传感器响应曲线的影响。可见,支撑桥越长,在高气压端传感器输出电压越大,在低气压端输出电压越小,在测量范围内输出电压摆幅越大,传感器灵敏度越高。但是支撑桥太长会降低微热板的机械强度,所以本文结合实际工艺条件设计多晶硅加热电阻的微热板真空传感器的支撑桥长为  $65 \mu\text{m}$ ,且理论分析和实际加工中支撑桥宽度取  $21 \mu\text{m}$ 。

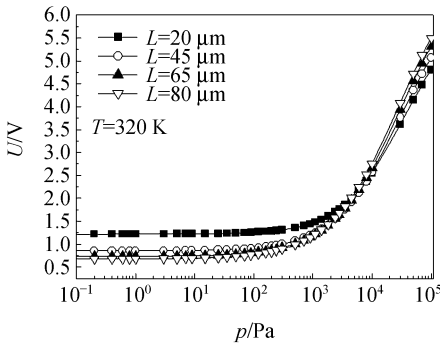


图 5 支撑桥长度对传感器响应曲线的影响

Fig. 5 Effect of supporting beam lengths on sensor response curves

### 4 加工与测试

图 6 是采用表面微机械加工技术成功制作的微热板电阻真空传感器的扫描电镜图。其制作工艺主要步骤如下:在热氧化后硅片上淀积并刻蚀  $0.5 \mu\text{m}$  LPCVD 多晶硅作为牺牲层;淀积 PECVD  $\text{SiO}_2\text{-Si}_3\text{N}_4\text{-SiO}_2$  复合层;淀积并刻蚀掺杂多晶硅电阻;淀积 PECVD 二氧化硅及刻蚀接

触孔;溅射铝金属并刻蚀铝连线;淀积 PECVD  $\text{SiO}_2$  作钝化层并开压焊孔;干法刻蚀腐蚀窗口;TMAH 腐蚀牺牲层。

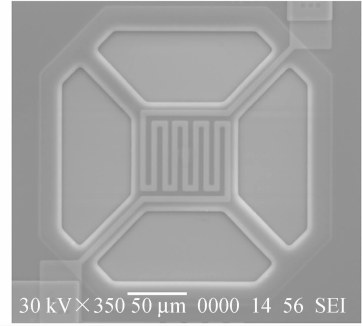
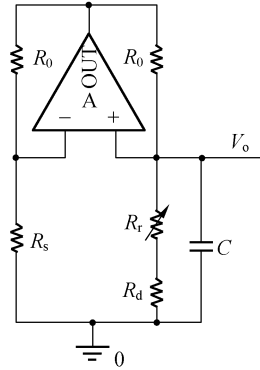


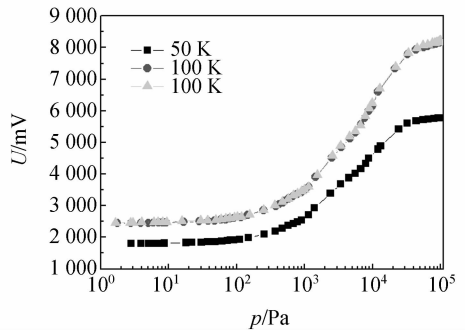
图 6 微热板电阻真空传感器的扫描电镜图

Fig. 6 SEM of MHP-based thermal vacuum sensor



(a) 恒温测试电路

(a) Circuit under constant temperature



(b) 恒温模式传感器的响应曲线

(b) Sensor response curves under constant temperatures

图 7 恒温测试电路及传感器在不同温升下的响应曲线

Fig. 7 Circuit under constant temperature and sensor response curves under constant temperatures

将微热板加热电阻  $R_s$  接入图 7(a) 的恒温测试电路中,得到恒温条件下微热板真空传感器的响应曲线如图 7(b) 所示。其中,微热板真空传感器平均温升为 50 K 和 100 K。可见,传感器输出电压都随气压增加而增加,输出电压摆幅达到几伏。当工作温度为 100 K,气压从 2 Pa 变化到一个大气压附近时,输出电压变化了约 6 V,且在很宽的气压范围内传感器都有较高的灵敏度。传感器的实测结果与前面理论分析的结果基本一致,在数值上的一些偏差可能是由于计算过程中采用的参数与各参数的实际大小有偏差以及传感器的加工误差和残余变形引起的尺寸偏差造成的。

## 5 结 论

微型真空传感器作为微传感器领域的一个

重要方向,有广泛的运用前景。本文介绍了恒温工作模式下微热板真空传感器的工作原理,在对微热板传热特性进行理论分析的基础上,分析了微热板加热电流、各种传热形式散失的热量、传感器的输出电压随气压的变化关系,以及传感器的结构尺寸对传感器响应特性的影响,并设计了一种中间方形区域为  $93\ \mu\text{m} \times 93\ \mu\text{m}$ 、支撑桥长  $65\ \mu\text{m}$ 、宽  $21\ \mu\text{m}$  的四臂支撑的微热板真空传感器。采用表面微机械加工技术成功完成了该传感器的加工,测试结果显示该传感器在  $2 \sim 10^5\ \text{Pa}$  敏感范围内,输出电压变化约 6 V,有较高的灵敏度。

## 参考文献:

- [1] 王皓,罗先刚,姚汉民,等.微机械往复式无阀泵的振动特性分析[J].光学精密工程,2005,13:98-102.  
WANG H, LUO X G, YAO H M, *et al.*. Analysis on the vibrating characteristics of a micro mechanical valveless pump[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005,13(6):98-102. (in Chinese)
- [2] 刘武发,龚振邦,蒋蓁.微型压电陶瓷棒角速率陀螺设计[J].光学精密工程,2006,14(3):439-444.  
LIU W F, GONG ZH B, JIANG ZH. Design of micro piezoelectric ceramic rod angular rate gyro[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006,14(3):439-444. (in Chinese)
- [3] 孟扬,李旺奎.真空计的发展新趋势[J].真空科学与技术,1999,19(2):116-119.  
MENG Y, LI W K. New development trend of vacuum meters[J]. *Vacuum Science and Technology (China)*, 1999, 19(2):116-119. (in Chinese)
- [4] 张凤田,唐祯安,高仁璟,等.微热板式气压传感器结构与热分析[J].光学精密工程,2004,12(6):598-602.  
ZHANG F T, TANG ZH A, GAO R J, *et al.*. Design and thermal analysis of gas pressure sensor with micro-hotplate[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2004, 12(6):598-602. (in Chinese)
- [5] MITCHEL J, LAHIJI G R, KHALIL N. Encapsulation of vacuum sensors in a wafer level package using a gold-silicon eutectic[C]. *The 13th international conference on solid-state sensors, actuators and microsystems, Transducers*,2005:928-931.
- [6] 王跃林,江刺正喜.微型力平衡微机械真空传感器研究[J].真空科学与技术,1999,19(4):304-311.  
WANG Y L, ESASHI M. Novel force-balanced micromechanical vacuum sensors[J]. *Vacuum Science and Technology (China)*, 1999,19(4):304-311. (in Chinese)
- [7] STARK B H, MEI Y H, ZHANG C B. A doubly anchored surface micromachined Pirani gauge for vacuum package characterization[C]. *Proceedings of the 16th International IEEE MicroElectro-Mechanical Systems Conference (MEMS 2003)*, 2003:506-509.
- [8] WENG P K, SHIE J S. Micro-Pirani vacuum gauge [J]. *Review of Science Instrument*,1994,65 (2):492-499.
- [9] ZHANG F T, TANG Z, YU J, *et al.*. A micro-Pirani vacuum gauge based on micro-hotplate technology[J]. *Sensors and Actuators A*,2006,126:300-305.