

国外传感器及其应用

1

宋尔纯 译
施锡昌 校

安徽省敏感技术中心
安徽电子科学研究所

国外传感器及其应用

(1)

宋尔純 譯

施锡昌 校

安徽省敏感技术开发中心

安徽电子科学研究所

内 容 提 要

本书选译自国外最新资料,收集有关专利、论文及技术报告20篇,传感器专利题录419条。本书内容丰富而实用,图文并茂,译文流畅,及时反映出国外传感器的新水平和发展动态,有助于从事传感器研究、设计和使用人员开阔视野,丰富设计思想,开发新产品,提高技术业务。

读者对象主要是从事工业仪表、传感器的研究、设计、制造、使用的工程技术人员,管理人员,技术工人和大专院校师生。

国外传感器及其应用(1)

宋尔纯 译

施锡昌 校

* * *

编辑:安徽省敏感技术开发中心编译部

(合肥市蜀山路3号)

印刷:合肥市肥东印刷厂

出书:1986年6月

• 内部交流 •

资料索取号:AC—001 每册收工本费:3元

目 录

1. 半导体压力传感器的温度特性分析	(1)
2. 压力传感器	(15)
3. 半导体传感器的可靠性	(21)
4. 采用新型半导体传感器的微差压变送器	(35)
5. 采用多功能传感器的差压变送器	(42)
6. 压电陶瓷式压力传感器	(56)
7. 湿敏复合烧结元件的制作方法	(70)
8. 湿敏元件的特性恢复方法	(74)
9. 陶瓷湿度传感器	(80)
10. 热敏电阻绝对湿度传感器的应用	(88)
11. 电子式湿度传感器的原理与应用	(98)
12. 静电电容式湿度传感器及其应用	(108)
13. 热流传感器 (1)	(115)
14. 热流传感器 (2)	(119)
15. 调制式非接触温度传感器	(128)
16. 光纤液位传感器	(133)
17. 单片式生物传感器的制作方法与特性	(140)
18. 接近超声波传感器	(145)
19. 差动电容式角度传感器	(153)
20. 波动能式地震传感器	(163)
× × ×	
国外传感器专利题录	(175)

半导体压力传感器的温度特性分析

嶋山 智等

一、前言

半导体压力传感器是在硅膜片上用扩散法形成压阻元件，根据压阻元件电阻变化来检测压力。此种压力传感器具有无滞后、体积小和灵敏度高等优点，因而广泛应用于汽车和工业仪表。与金属应变计相比，压阻元件的应变系数约大50倍，但与高灵敏度的特性相反，非线性和温度系数却很大。于是，对此加以改善，就成为半导体压力传感器实用中急待解决的课题。

本论文着重对半导体压力传感器的温度特性详加分析，并介绍一种改善特性的方法。一般说来，压力传感器的温度特性可由零位和满量程（施加额定压力时的输出电压幅度）输出的特性来评价，但决定特性的主要因素却都是：（1）压阻元件自身的温度系数；（2）固定硅膜片时产生的热应力。对（1）有库尔茨（Kurtz）、格拉韦尔（Gravel）发表的论文“采用径向切割压敏电阻的半导体传感器”，对（2）有白水、佐藤等所作的技术报告“硅压力传感器及其应用”。本文作者对压阻系数的高次项作了详细分析，并对热应力加以分析之后，才写成这篇改变压力传感器特性的学术论文。本论文着眼于硅单晶的线膨胀系数随温度范围不同而不同的特性，采用把压阻系数的非线性考虑在内的关系式，对压力传感器的温度特性作了详细分析。

压力传感器的结构如图 1 所示。厚度为 H 的硅单晶片，在其直径为 $2A$ 的中央部位，厚度减薄至 h ，以形成随压力产生挠曲的膜片，并在其表面扩散压阻元件。用粘接剂在膜片边缘部位形成厚度 T ，并将其固定在支座上，然后再将外径为 d 、长度为 L 的支座固定在底座上。采用这种形式，可用有限元法计算出因各构件线膨胀系数差引起的硅膜片的热应力。再以此为依据，计算压阻元件的电阻变化，便可求得与温度相对应的桥式电路的输出电压。

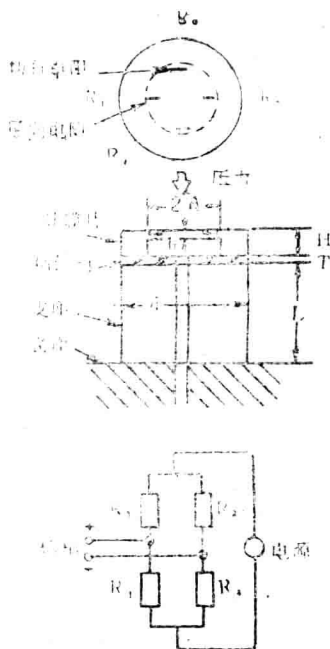


图 1. 硅膜片压阻式压力传感器与桥式电路

二、压阻元件的温度特性

压阻元件的电阻 R ，是温度和应力的函数，可用分别设为 k 次和 j 次高次项的下式表示：

$$R(\delta_L, \delta_t, t) \simeq R(0, 0, 0) \cdot \left[1 + \sum_{k,j} \left\{ a_k t^k + \pi_{Lj} (1 + b_{LKj} t^k) \delta_L^j + \pi_{tj} (1 + b_{tKj} t^k) \delta_t^j \right\} \right] \quad (1)$$

式中 δ_L, δ_t ——电阻元件的纵向和横向的应力；

t ——温度变化；

a_k ——电阻温度系数；

π_{tj}, π_{Lj} ——纵向应力和横向应力的压阻系数；

b_{LKj}, b_{tKj} ——温度系数。

上述系数随形成压阻元件的P型杂质硼的浓度不同而不同。图2所示为浓度为 $2 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ 的压阻元件的温度特性的测量结果。图2中，(a)是电阻变化，主要是由式(1)中的 a_k 而来；(b)是压阻系数，按温度系数 b 变化。两者的变化量大致是相等的，而方向却相反。因此，通过将电阻元件组成恒流激励的电桥，如图2所示，就可以获得 $(a) + (b) = (C)$ 的特性曲线。

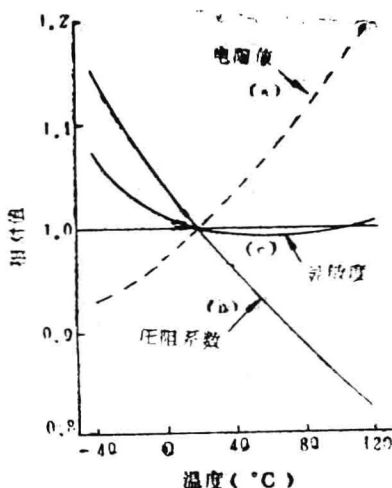


图 2. 电阻值、压阻系数及灵敏度与温度的关系

桥路的零位输出电压 V_0 可用下式表示:

$$V_0 = \frac{R_1 R_2 - R_3 R_4}{R_1 + R_2 + R_3 + R_4} \cdot I_s \quad (2)$$

式中 R_1, R_2 ——设置在膜片径向的电阻元件, 其电阻值随压力的增大而增大;

R_3, R_4 ——设置在切向的电阻元件, 其电阻值随压力的增大而减小;

I ——桥路激励电流。

假如各元件的起始电阻值谐调, 加在纵向和垂直方向的应力和压阻系数又相等时, 那么, 输出电压 V_0 就可简化为下式:

$$V_0 = R \pi \left[1 + (a_K + b_{K_i}) t^k \right] \delta I_s \quad (3)$$

式中 R ——各元件的电阻值，
 a_K ——各元件的电阻温度系数，
 π ——压阻系数，
 b_{Kj} ——压阻系数的温度系数。

由式(3)可知，若减小电阻温度系数及压阻系数的温度系数，就能缩小如图2所示的温度引起的满量程输出的变化。为此，压阻元件的杂质浓度以 $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 为宜。

三、热应力的分析

随着离子注入技术等半导体工艺的进步，现已能够精确控制压阻元件的电阻值及温度系数，并且，误差相当小。可是，将硅膜片固定在支座上时，在几百°C的加热过程中，两者的线膨胀系数差会引起压阻元件的热应力增加，因而存在温度特性的变化问题。为此，首先就要求支座的线膨胀系数须近似于硅。如图3所示，硼硅玻璃虽是近似于硅的理想材料，但由于硅的线膨胀与温度是非线性的，因而两者粘结时又会产生热应力的问题。

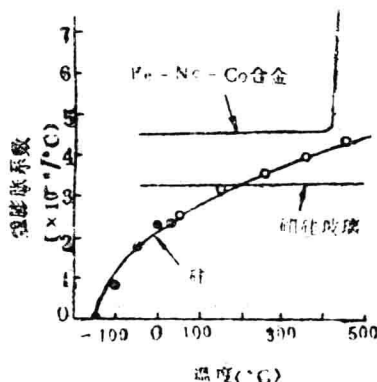


图3. 用于硅传感器的材料的热膨胀系数

图中 ———— 据 L. Maissel 的文献。

• ———— 据 D. F. Gibbons 的文献。

据吉本斯等的实验检测结果表明，硅的线膨胀系数与温度变化的关系有着较大的非线性。本文据其所得的实验值，设硅的线膨胀系数 β_s 为温度 t ($^{\circ}\text{C}$) 的函数，则可用下式表示：

$$\beta_s = 0.175 \sqrt{t + 150} \times 10^{-6} \quad (4)$$

式 (4) 的曲线如图 3 所示。

热应力值与硅膜片和支座的线膨胀系数之差成正比。膜片很薄时，可考虑用下式：

$$\delta = Y_{\eta} \int_{t_s}^{t_s} (\beta_d - \beta_s) dt \quad (5)$$

式中 Y —硅膜片的纵向弹性系数；

η —由固定膜片部位的形状决定的形状系数；

β_d —支座的线膨胀系数；

β_s —硅膜片的线膨胀系数；

t_s —粘结剂的固化温度。

在一定温度变化范围内，可用有限元法先计算压阻元件所产生的热应力，并检查热应力较小时固定部位的形状。然后，根据式 (4)、(5) 求温度与热应力的关系。两项计算都是按图 1 所示的样品进行的。

首先，膜片的厚度比 H/h 与压阻元件所产生的热应力的关系如图 4 所示。为减小热应力，要求厚度 H/h 之比须大至几十倍。其次，支座的长/径比 L/d 与热应力的关系如图 5 所示。若用长/径比大于 1 的细长形状的支座，则可减小热应力。再者，粘结剂厚度 T 与热应力的关系如图 6 所示。粘

结剂的材料现多用硼硅玻璃。此外，构件材料用硅，只需要计算粘结剂的影响。若粘结剂的厚度薄至 $10\mu\text{m}$ 时，便可减小热应力。

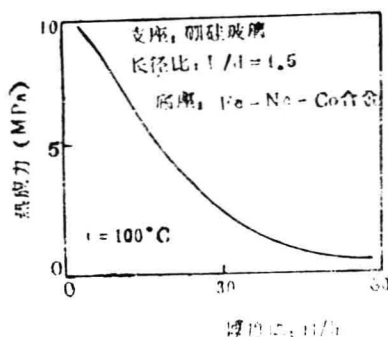


图4. 热应力与厚度比的关系

一般说来，以上所研究的热应力，在膜片断面范围内是均匀分布的薄膜应力，其次，从观测膜片表面形状的结果来看，还存在弯曲应力。这种弯曲应力的大小也同样与硅膜片和支座的线膨胀系数有关。图7所示为用有限元法计算弯曲应力所得的结果。膜片的直径 $2A = 1.6\text{mm}$ ，厚度 $h = 0.025\text{mm}$ ，与固定部位的厚度比 $H/h = 7$ ，支座的外径 $d = 3\text{mm}$ ，长度 $L = 5\text{mm}$ ，材料用硼硅玻璃，底座用铁镍钴（Fe-Ni-Co）合金，用图3给出的线膨胀系数进行计算。与硅的线膨胀相对应，热应力也随温度变化而产生非线性变化。

图5. 热应力与支座的长径比的关系

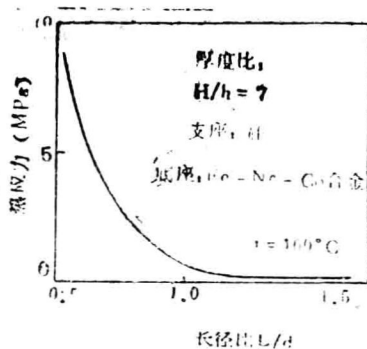


图6. 热应力与粘结剂厚度的关系

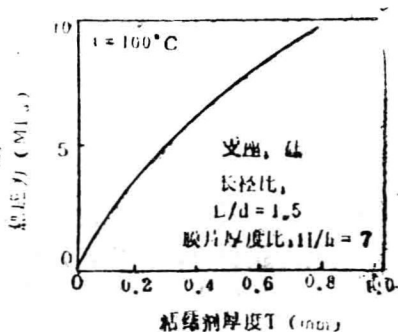
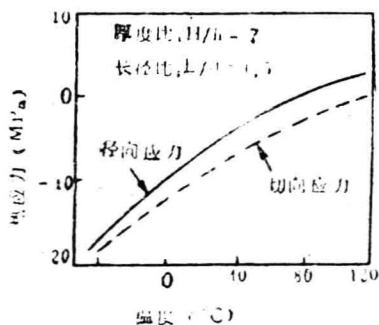


图7. 硅膜片热应力与温度的关系



四、满量程输出的温度特性

压阻元件的满量程输出的温度特性，如前所述，通过采用恒流激励电桥，选定适当的杂质浓度，在 $0 \sim 100^{\circ}\text{C}$ 的温度范围内，其变化可以大大降低（参照图 2）。可是，如上一节所述，由于硅膜片和支座的线膨胀系数之差而产生热应力，因而带来温度特性恶化的问题。影响满量程输出的温度特性的是分布于整个膜片断面的薄膜压力。这个问题可作为圆片表面承受平行压力引起的变形问题来加以分析。参照图 8 所示的模型，膜片的中心挠度 W 可用下式表示：

$$W = \frac{W_p}{1 - \alpha} \quad (6)$$

式中 W_p —无平行力 N ，仅施加压力 P 时的挠度，

α —施加平行力引起的位移调制系数。

在环境条件固定的前提下， α 可用下式表示：

$$\alpha = \frac{NA^2}{14.86D} \quad (7)$$

式中 A —膜片的半径，

D —抗弯刚性，

N —在考虑热应力的场合，作用在膜片外周的单位长度的力，可作为膜片厚度 h 和热应力 δ 之积来求解。

此外，膜片表面加压引起的应力值（与输出变化范围对应）相对应的调制系数 γ ，若代入式（7）的位移调制系数 α ，则可用下式表示：

$$\gamma = \frac{1 + C \cdot \alpha}{1 - \alpha} \quad (8)$$

式中 C —由压阻元件的位置和膜片的径向变形系数决定的常数。

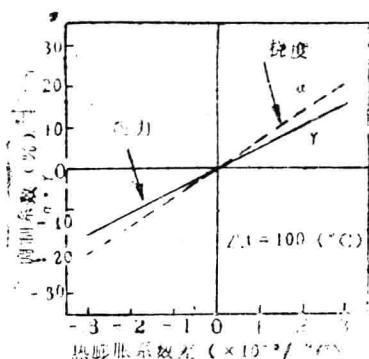


图 8. 调制系数及硅膜片与支座的热膨胀系数差的关系

根据上述分析，计算出支座与硅膜片的线膨胀系数差与量程调制系数，可得图 8 所示的结果。由图 8 可知，支座的线膨胀系数大于膜片时，调制系数为 + 值，因而相当于满量程输出增大。其次，再来计算压力传感器的满量程输出的温度特性。其结果如图 9 所示。图 9 中，(a) 是补偿前的特性。(b) 是补偿后的特性。曲线 (a) 与前述图 2 中的曲线 (c) 相对应，但由于硅膜片与硼硅玻璃座的线膨胀系数差引起的热应力不尽相同，因而，满量程输出变化略有增大。

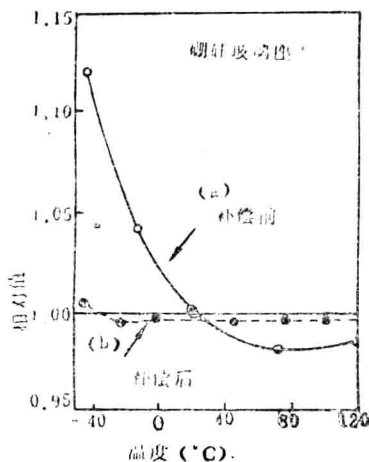


图9. 桥式电路满量程输出与温度的关系

下面介绍满量程输出的温度特性补偿方法。压阻元件的桥路输出电压 V_0 是压力 P 和温度 T 的函数，根据式(3)可用下式表示：

$$V_0(p, t) = \Delta R(p) \left\{ 1 + g_1(t) \right\} \cdot I_{10} \left\{ 1 - g_2(t) \right\} \quad (9)$$

式中 $\Delta R(p)$ ——在标准温度状态下压力引起的电阻变化，相当于式(3)中 $\Delta R = R_{\pi} \delta$ 的压力项；

$g_1(t)$ ——相当于式(3)中大括号内的第2项，该项取决于温度；

I_{10} ——在标准温度状态下的激励电流，用图10所示的热敏电阻TH和电阻 $r_1 \sim r_3$ 进行调制。

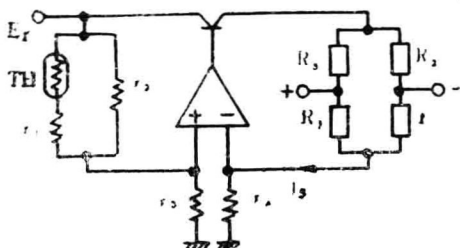


图10. 与温度有关的满量程输出的温度补偿电路

热敏电阻的B常数为 2500 K ，电阻的温度系数为 $100 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ，在一块铝片上构成厚膜电路，电阻用激光微调法修正。

五、零点的温度特性

从桥路的零位电压来看，压阻元件原来的电阻值不等、电阻温度系数不等及前述的热应力是导致受温度影响的重要因素。其关系可用下式表示：

$$V_o(t) = R \left[\xi \left\{ 1 + \alpha(t) \right\} + \zeta \cdot \alpha(t) + \pi \cdot \delta(t) \right] \cdot I_s \quad (10)$$

式中 R —在标准温度状态下元件的平均电阻值；

ξ —元件的平均电阻值误差；

$\alpha(t)$ —电阻温度系数的平均值；

ζ —电阻温度系数平均值的误差；

π —压阻系数；

$\delta(t)$ —热应力（参看图7）。

设 $\xi = 0$ 、 $\xi = 0.1\%$ ，计算与温度相对的桥路输出电压，以了解热应力的影响。计算结果如图 11 所示。图 11 中，

(a) 曲线是补偿前的特性，零漂大，热应力影响也大。因此，就采用图 12 所示的热敏电阻和电阻电路来对零点漂移进行补偿。其结构与前述的量的温度特性补偿用的厚膜电阻基片相同。图 11 中 (b) 曲线是补偿后的特性。

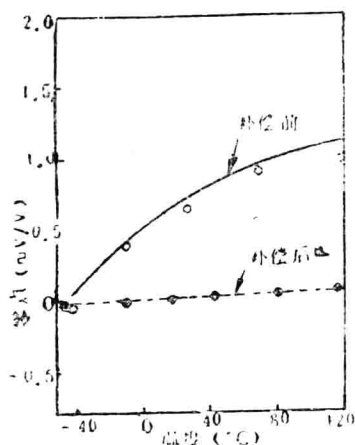


图 11. 零点与温度的关系

——: 计算值
 ○: 实验值

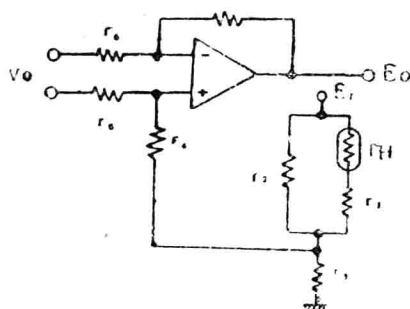


图 12. 零点温度补偿电路