

# 电容式绝对压力传感器的改进模型 及温度特性分析\*

刘 娜 黄庆安 秦 明 周闵新

(东南大学 MEMS 教育部重点实验室, 南京 210096)

**摘要:** 在传感器敏感膜模型的基础上对电容式绝对压力传感器提出了一种改进模型, 考虑了由于温度的变化电容结构空腔中残余气体对传感器性能产生的影响. 结果表明温度的改变会导致残余气体压力的改变, 进而使传感器的测量产生一定的温度漂移, 同时也降低了传感器的灵敏度; 并由此计算了残余气体存在时, 传感器测量值的温度漂移量以及灵敏度的温度系数. 这对于工艺的改进以及后续电路的设计具有指导意义.

**关键词:** 电容式绝对压力传感器; 改进模型; 残余气体; 温度漂移; 灵敏度

EEACC: 2575; 8460

中图分类号: TN248

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2005)07-1369-05

## 1 引言

MEMS 压力传感器主要有压阻式压力传感器和电容式压力传感器两种. 由于电阻值受温度影响较大, 所以压阻式压力传感器一般存在较大温度漂移, 需进行温度补偿, 国内外对其温度漂移特性的研究成果较多. 通常认为, 电容式压力传感器温度特性较好, 因而对电容式压力传感器温度漂移的研究较少. 随着 MEMS 技术的进步, 对电容式压力传感器性能有了更高的要求. 因此, 其温度特性开始受到人们的关注.

实验表明, 环境温度改变后压力传感器的电容值会相应改变, 主要有以下几方面的原因: (1) 硅膜、氧化层以及玻璃之间的热膨胀系数失配; (2) 杨氏模量的负温度特性; (3) 电容空腔中残余气体压力的影响等.

Blasquez 等人<sup>[1,2]</sup>详细研究了由于硅膜、玻璃的热膨胀系数失配导致温度对传感器性能的影响, 并计算出了温度系数, 同时分析了减小温度系数的办法. Paul 等人<sup>[3]</sup>通过实验测得了由键合形成的电容真空腔中残余气体压力的大小. Huang 等人研究了

由键合形成的电容真空腔中残余气体的成分及温度对其压力的影响<sup>[4]</sup>.

本文研究了电容结构空腔中残余气体的存在导致温度对电容式绝对压力传感器性能的影响. 首先建立了传感器敏感膜的理论模型, 并用有限元工具 ANSYS 进行验证. 然后考虑电容结构空腔内残余气体的存在以及温度改变对残余气体压力的影响, 对传感器模型进行修正, 得到了改进模型. 最后分析了传感器的温度漂移, 并计算了一定残余气体压力下其灵敏度的温度系数, 为后续信号处理电路的设计提供了依据.

## 2 模型

电容式硅压力传感器是一个具有可动极板的平板电容结构, 如图 1 所示. 可动极板为硅或多晶硅膜. 当有外部压力作用于薄膜上时, 薄膜受力弯曲, 导致电容两极板的间距变小, 引起电容值的改变(由于采用真空封闭结构, 因此电容板膜总是下凹的, 并且所测的为大气绝对压力). 这样实现了将被测压力的变化转换为电容量的变化, 再经测量转换电路转换为电压、电流或频率. 测量绝对压力传感器的电

\* 国家高技术研究发展计划资助项目 (批准号: 2004AA404030)

刘 娜 女, 1982 年出生, 硕士研究生, 研究方向为 CMOS MEMS.  
2004-10-07 收到, 2004-12-17 定稿

容部分采用真空密封结构,但是由于工艺等因素的影响,电容空腔中存在残余气体,不能达到绝对的真空,如图 2 所示.由于残余气体对硅膜有压力,并且压力随着环境温度的改变而改变,从而使传感器的输出值有一定的温度漂移,同时,传感器的灵敏度也会受到温度的影响.

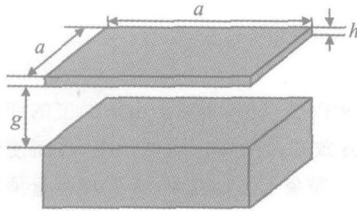


图 1 电容式压力传感器的力学模型

Fig. 1 Mechanical model of capacitive pressure sensor

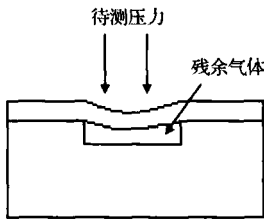


图 2 压力传感器中的电容结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of structure of capacitance in pressure sensor

### 2.1 传感器敏感膜的理论模型

本文中建立的传感器敏感膜模型为周边固支的方形膜大变形-负载模型.膜在外加负载作用下产生形变,负载所做的功转化为膜的弹性能,使得膜在某一位置达到平衡,势能总和为最低(能量最低原理).图 3 给出了方形平膜在外加负载情况下的形变示意图.膜长宽均为  $2a$ ,厚度为  $h$ .取膜中心为原点并建立坐标系.负载方向为  $w$  方向.

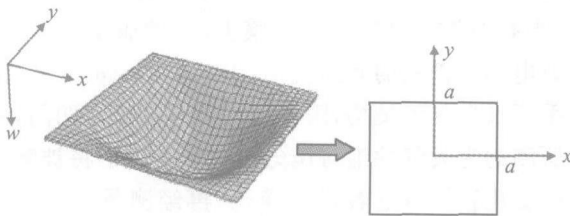


图 3 方形膜的负载-形变示意图及模型坐标系设定

Fig. 3 Schematic diagram of load-deflection of square membrane and coordinate system presentation of the analytical model

在大负载即大形变情况下,根据平衡条件和物理关系建立的膜特征方程得不到精确的解析解.用能量法可以得到精确度较高的近似解.能量法的基本原理是利用能量最低原理确定板的形变大小.通常是根据经验假设板的具体形变形状函数,然后根据板的能量公式,利用能量最低原则确定其中的具体参数,而得出形变的函数表达式.

假设膜内各点的位移方程<sup>[5]</sup>如下:

$$\begin{aligned}
 u(x, y) &= u_0 \sin \frac{x}{a} (1 + \cos \frac{y}{a}) \\
 v(x, y) &= u_0 \sin \frac{y}{a} (1 + \cos \frac{x}{a}) \\
 w(x, y) &= w_0 \frac{(1 + \cos \frac{x}{a})(1 + \cos \frac{y}{a})}{4}
 \end{aligned} \tag{1}$$

$x$  方向和  $y$  方向膜的位移为  $u$  和  $v$ ,则膜的三个应变可以由三个位移表示,在大形变情况下,有以下关系<sup>[6]</sup>:

$$\begin{aligned}
 \epsilon_x &= \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{2} \left( \frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 \\
 \epsilon_y &= \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{1}{2} \left( \frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 \\
 \epsilon_{xy} &= \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial x} \times \frac{\partial w}{\partial y}
 \end{aligned} \tag{2}$$

式中  $\epsilon_x$  和  $\epsilon_y$  为膜在  $x, y$  方向的正应变;  $\epsilon_{xy}$  为  $x, y$  方向的剪应变.

在大变形情况下,根据假设的位移函数,利用能量法得到外加负载与膜中心最大挠度  $w_0$ ,膜材料参数  $E$  和  $\mu$  的关系如下:

$$\begin{aligned}
 p(w_0) &= \frac{4 E h^3}{24 a^4 (1 - \mu^2)} w_0 + \\
 &\quad \frac{3}{2048 a^4 (1 - \mu^2)} \frac{4 E h (21 + 4 \mu - 6 \mu^2)}{w_0^3}
 \end{aligned} \tag{3}$$

由上式可以看出,膜的负载-形变模型是膜中心挠度  $w_0$ 、泊松比  $\mu$ 、杨氏模量  $E$ 、膜长度  $a$  和厚度  $h$  的函数.

### 2.2 有限元模拟验证

有限元方法是传感器建模的另一种方法,比解析法具有更高的精确度,可以作为解析模型的验证工具.我们选取半导体工艺中的多晶硅膜来进行有限元分析,并将分析结果与负载-解析模型进行比较.有限元分析传感器膜参数由表 1 给出.

通过 ANSYS 模拟了在不同待测压力下膜的中心最大挠度,与理论模型的计算结果基本一致,误差

小于 5%。同时对中心面、对角面内各点在一定压力下的挠度变化进行了模拟,并与理论模型的计算进行了比较,结果基本一致,边界上的点误差最大,小于 9%。

表 1 传感器膜参数设定

Table 1 Parameters of pressure-sensing membrane of pressure sensor

模型参数	FEM
膜边长 $2a/\mu\text{m}$	60
膜宽 $h/\mu\text{m}$	0.5
负载 $p/\text{MPa}$	0.11
杨氏模量 $E/\text{MPa}$	$1.6 \times 10^5$
泊松比 $\mu$	0.22

### 3 改进模型

残余气体压力的定义为:在某一特定温度下,真空腔中使弹性膜保持平衡状态的气体压力<sup>[3]</sup>。设在初始环境温度  $T_1$  (一般定为常温 300 K) 下,腔内残余气体压力为  $p_1$ ,真空腔的初始体积为  $V_1$ ;当环境温度改变时,腔内气体受温度影响热胀冷缩,对弹性膜的压力改变,使弹性膜上各点的挠度改变。设环境温度为  $T_2$  时,腔内气体体积为  $V_1 - V$ ,腔内气体压力为  $p_2$ ,根据气体平衡方程得:

$$\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 (V_1 - V)}{T_2} \quad (4)$$

由上式解出  $p_2$ , 得:

$$p_2 = C(p_1) \frac{T_2}{V_1 - V} \quad (5)$$

其中,

$$C(p_1) = \frac{p_1 V_1}{T_1} \quad (6)$$

在传感器薄膜受力达到平衡时,其所受到的压力  $q$  为待测量的压力  $p$  与腔内残余气体压力  $p_2$  的差值,如下式:

$$q = p - p_2 = p - C(p_1) \frac{T_2}{V_1 - V} \quad (7)$$

根据我们建立的传感器膜的理论模型,将膜所受压力  $q(w_0)$  与中心挠度  $w_0$  的关系式带入(3)式得(不考虑膜内残余应力的影响):

$$q(w_0) = \frac{4}{24(1 - \mu^2)} \times \frac{Eh^3}{a^4} w_0^3 + \frac{3^4(21 + 4\mu - 6\mu^2)}{2048(1 - \mu^2)} \times \frac{Eh}{a^4} w_0^3 \quad (8)$$

将(7)式代入(8)式,得到修正后的外加负载  $p(w_0)$  与中心最大挠度  $w_0$  的关系式:

$$p(w_0) = C(p_1) \frac{T_2}{V_1 - V} + \frac{4}{24(1 - \mu^2)} \times \frac{Eh^3}{a^4} w_0^3 +$$

$$\frac{3^4(21 + 4\mu - 6\mu^2)}{2048(1 - \mu^2)} \times \frac{Eh}{a^4} w_0^3 \quad (9)$$

对于方形膜而言,当膜没有形变时,真空腔体积为:

$$V_1 = (2a)^2 g \quad (10)$$

$V$  为由于膜受力变形而导致腔体积的改变量,膜的形变可近似为球冠,则

$$V = \frac{1}{6} w_0 (3a^2 + w_0^2) \frac{a^2 w_0}{2} \quad (11)$$

### 4 传感器的温度特性分析

#### 4.1 恒定温度下,不同残余气体压力对传感器性能的影响

当环境温度保持不变时,

$$p(w_0) = \frac{p_1 V_1}{V_1 - V} + \frac{4}{24(1 - \mu^2)} \times \frac{Eh^3}{a^4} w_0^3 + \frac{3^4(21 + 4\mu - 6\mu^2)}{2048(1 - \mu^2)} \times \frac{Eh}{a^4} w_0^3 \quad (12)$$

将(10),(11)式及材料参数(表 1 所示)带入(12)式得:

$$p(w_0) = \frac{4 \times 10^{-6}}{4 \times 10^{-6} - 1.57 w_0} p_1 + 1.053 \times 10^{11} w_0 + 3.197 \times 10^{23} w_0^3 \quad (13)$$

由上式看出, $p(w_0)$  是中心最大挠度  $w_0$  的非线性函数,与  $p_1$  呈一次线性关系,(13)式的第一项反映了特定温度下,残余气体压力在负载-形变模型中的作用。

根据计算,当材料的泊松比及材料尺寸都确定时,模型中的  $p_1$  的系数  $\frac{4 \times 10^{-6}}{4 \times 10^{-6} - 1.57 w_0}$  是中心最

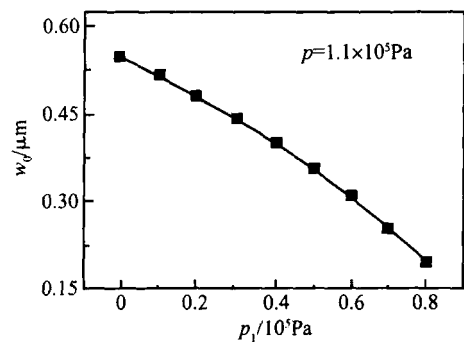


图 4 常温(300 K)下,腔内残余气体压力与中心最大挠度的关系曲线

Fig. 4 Central deflection curve of the membrane as a function of residual gas pressure within the cavity

大挠度  $w_0$  的函数. 图 4 所示为外加负载为  $1.1 \times 10^5 \text{ Pa}$ , 环境温度为  $27 \text{ (300 K)}$ , 残余气体压力范围为  $0 \sim 0.8 \times 10^5 \text{ Pa}$  时, 对应的  $w_0 - p_1$  曲线.

如图所示, 当残余气体压力从 0 变化到  $0.8 \times 10^5 \text{ Pa}$  时, 膜的中心位移从  $0.55 \mu\text{m}$  下降到  $0.2 \mu\text{m}$ , 说明残余气体压力严重影响了膜的形变. 分析结果说明, 在一定温度下, 当真空腔内存在较大的残余气体压力时, 我们在分析膜的形变时需要考虑残余气体压力的影响. 同时, 在制备电容式压力传感器时, 要采用有效的措施来达到电容空腔较高的真空度, 如采用真空硅玻璃阳极键合.

### 4.2 传感器灵敏度的温度系数(TCS)

TCS 定义如(14)式所示

$$\text{TCS} = \frac{1}{S} \times \frac{\partial S}{\partial T} \quad (14)$$

$$S = \frac{\partial C}{\partial p} \quad (15)$$

$S$  为传感器的灵敏度.

图 5 是当残余气体压力  $p_1$  为  $0.5 \times 10^5 \text{ Pa}$  时, TCS 随温度的变化曲线. 不考虑残余气体压力影响时, 传感器的灵敏度为  $0.052 \text{ fF/kPa}$ .

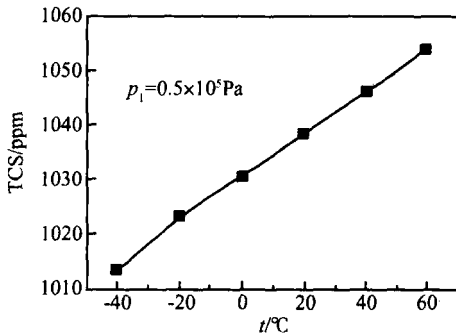


图 5 传感器灵敏度的温度系数

Fig. 5 Temperature coefficient of sensitivity (TCS) of the sensor

如图所示, 当残余气体压力为  $0.5 \times 10^5 \text{ Pa}$ , 温度变化范围为  $-40 \sim 60$  时, TCS 的变化范围为  $1013 \sim 1053 \text{ ppm}$ . TCS 的值大于  $1000 \text{ ppm}$ , 表明传感器的灵敏度受温度影响较大, 需要进行一定的温度补偿来提高传感器的灵敏度.

### 4.3 当腔内残余气体压力一定时, 传感器测量值的温度漂移量计算

将已知参数值代入(9)式可得到以下三幅图, 图

6 为不同温度下的  $C-p$  曲线. 如图所示, 当测量同一压力时, 不同的温度下, 测量值不同, 存在一定的温度漂移.

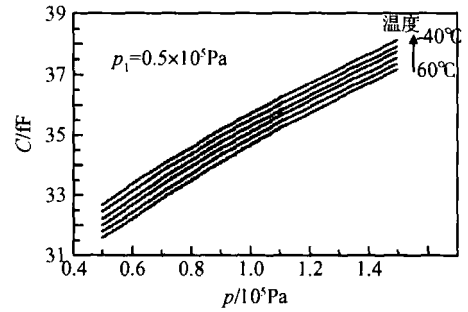


图 6 不同温度下的外加压力与电容值的关系曲线

Fig. 6 Capacitance change as a function of pressure load as a function of pressure load at different temperatures

图 7 给出了腔内残余气体压力一定, 测量压力  $p$  为  $1.1 \times 10^5 \text{ Pa}$  时, 测量电容值与温度的曲线 ( $C-t$ ). 由图 7 可以看出, 当测量压力  $p$  为  $1.1 \times 10^5 \text{ Pa}$  时, 温度范围为  $-40 \sim 60$  时, 电容值改变范围为  $35.2 \sim 36.2 \text{ fF}$ , 相对于常温时的电容值  $35.6 \text{ fF}$ , 测量值漂移量为  $280 \text{ ppm/}$ .

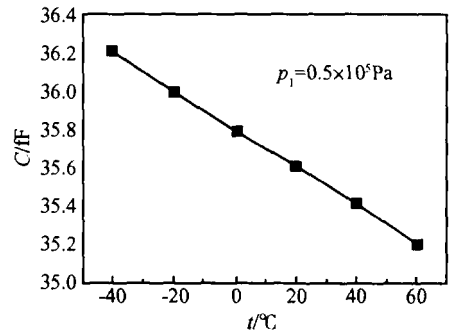


图 7 电容值与温度的关系曲线

Fig. 7 Capacitance change as a function of temperature

图 8 给出腔内残余气体压力一定时, 对于不同的待测压力, 电容值相对于常温时测量值的漂移量曲线 ( $\frac{1}{C(p)} \times \frac{\partial p}{\partial T} - p$ ). 当测量压力范围为  $0.6 \times 10^5 \sim 1.5 \times 10^5 \text{ Pa}$  时, 测量值漂移量的范围为  $250 \sim 351 \text{ ppm/}$ , 根据这个测量值可进一步确定压力传感器的测量范围.

如图 7 所示, 当腔内残余气体压力一定时, 电容值与温度的关系近似线性. 因而可在压力传感器的后续信号处理过程中, 根据这一近似线性关系设计简单的温度补偿电路, 来得到在没有温漂情况下应

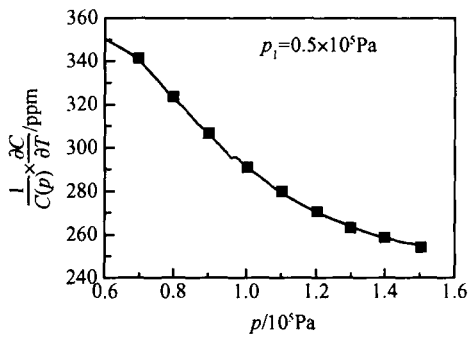


图 8 温度漂移量与外加负载的关系曲线

Fig. 8 Temperature offset curve of the sensor as a function of pressure load

测得的电容值,便于工程中的应用.

## 5 结论

首先建立了绝对压力传感器敏感膜的理论模型,采用 ANSYS 有限元方法对理论模型进行了验证.有限元模拟结果与理论模型计算结果基本一致,误差在 9%之内.在一般的电容式压力传感器的设计中,近似地把电容上下极板之间的空腔当作真空来计算,但实际中由于工艺等各方面的原因,并不能

达到绝对的真空.残余气体压力随温度的改变而改变,进而使传感器的测量产生一定的温度漂移,同时也影响了传感器的性能如灵敏度等.通过对传感器温度特性的分析,一方面检验工艺的准确性,可以通过改进工艺来达到更高的电容真空腔真空度;另一方面,计算结果可为后续电路的设计提供依据.

## 参考文献

[ 1 ] Blasquez G,Douziech C,Pons P. Analysis characterization and optimization of temperature coefficient parameters in capacitive pressure sensors. *Sensors and Actuators*,2001 ,A93 :44

[ 2 ] Blasquez G,Chauffleur X,Pons P,et al. Intrinsic thermal behaviour of capacitive pressure sensors. *Sensors and Actuators* ,2000 ,85 :65

[ 3 ] Paul O ,Haberli A ,Malcovati P ,et al. Design of sealed cavity microstructure formed by silicon wafer bonding. *Journal of Microelectromechanical System* ,1993 ,2(2) :74

[ 4 ] Huang Q A ,Qing M ,Zhang H Z. Silicon wafer bonding for sealed vacuum microelectronic device. *Proc 8th IEEE Vacuum Microelectron Conf* ,USA ,1995 :161

[ 5 ] Senturia S D. *Microsystem design*. 2nd ed. Kluwer Academic Publishers ,2001

[ 6 ] Timoshenko S P. *Theory of plates and shells*. New York: McGraw-Hill ,1959

# An Improved Model and Temperature Sensitivity Analysis of a Capacitive Absolute Pressure Sensor \*

Liu Na , Huang Qing 'an , Qin Ming , and Zhou Minxin

( Key Laboratory of MEMS of Ministry of Education , Southeast University , Nanjing 210096 , China)

**Abstract :** An improved model of capacitive absolute pressure sensors is presented based on the model for pressure-sensing membrane of pressure sensor ,and the effect of the sensor performance due to residual gas in the sealed cavities when temperature changes is considered. From the improved model we can get that the change of temperature leads to the change of pressure of the residual gas ,which will cause the offset of temperature to the measurement of the sensor ,and the sensibility will be reduced at the same time. Based on that ,we calculate the amount of the offset of temperature in measurement of sensor and the coefficient of sensitivity when residual gas exists. These results will guide the improvement of technology and design of the subsequent circuit.

**Key words :** capacitive absolute pressure sensor ; improved model ; residual gas ; offset of temperature ; sensibility

EEACC: 2575 ; 8460

Article ID: 0253-4177(2005)07-1369-05

\* Project supported by the National High Technology Research and Development Program of China(No. 2004AA404030)

Liu Na female ,was born in 1982 ,graduate student. Her research interests mainly focus on CMOS MEMS.

Received 7 October 2004 ,revised manuscript received 17 December 2004