

文章编号 1004-924X(2010)05-1166-09

# 高性能 MEMS 电容压力传感器的设计及其热分析

吕浩杰, 胡国清, 邹卫, 吴灿云, 陈羽锋  
(厦门大学 机电工程系, 福建 厦门 361005)

**摘要:** 为了进一步提高接触式电容压力传感器的性能, 设计了一种高性能双凹槽结构的接触式电容压力传感器, 并对该传感器在高温环境中的总体性能进行了分析。推导了热传导和热弹性理论, 并对影响传感器热分析的各个因素与温度的依赖关系进行了描述; 在整个分析过程中, 使用 ANSYS 软件并结合有限元方法对全尺寸传感器的热效应进行模拟。结果表明, 在接触工作状态双凹槽接触式电容压力传感器的温度对输入(压力)-输出(电容)特性的影响是线性的, 且线性范围内初始压力随温度的升高而降低; 当温度载荷为 550 K 时, 双凹槽结构的灵敏度为  $1.21 \times 10^{-6}$  pF/Pa, 比传统单凹槽的  $0.8 \times 10^{-6}$  pF/Pa 高出 50%, 表明该压力传感器有着非常优异的高温特性。

**关键词:** 双凹槽接触式电容压力传感器(DTMCPS); 热分析; 有限元法

**中图分类号:** TP212.12 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20101805.1166

## Design and thermal analysis of high performance MEMS capacitive pressure sensor

LU Hao-jie, HU Guo-qing, ZOU Wei, WU Can-yun, CHEN Yufeng

(Department of Mechanical and Electrical Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

**Abstract:** To improve the high temperature properties of touch mode capacitive pressure sensors, a Double-cave Touch Mode Capacitive Pressure Sensor (DTMCPS) is proposed and its overall performance in high temperature environment is analyzed significantly. Firstly, the theories of heat transfer and thermo-elasticity are deduced, and effects of many temperature dependence factors on thermal analysis of this sensor are described. Then, Finite Element Method and ANSYS software are used to simulate the thermal effect of the full dimension sensor during this analysis. The results indicate that the influence of temperature on the input (pressure load) and output (capacitance) characteristics is linear in a touch operation state of this DTMCPS, and its initial pressure of linear range reduces with temperature increasing. Furthermore, the sensitivity of double-cave structure sensor is  $1.21 \times 10^{-6}$  pF/Pa at 550 K, which has been 50% up on  $0.8 \times 10^{-6}$  pF/Pa of the traditional single-cave structure. These results show that this sensor has excellent high-temperature performance.

**Key words:** Double-cave Touch Mode Capacitive Pressure Sensor (DTMCPS); thermal analysis; Finite Element Method (FEM)

收稿日期: 2009-09-30; 修订日期: 2009-12-18.

基金项目: 国防军工科研资助项目 (No. XDTH2009232A)

# 1 引言

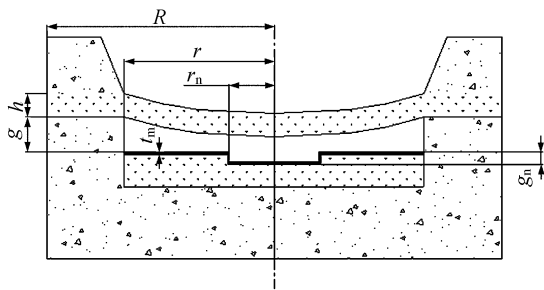
目前,压力传感器已在许多领域得到了广泛应用,如常见的真空微电子压力传感器<sup>[1]</sup>、光纤气压传感器<sup>[2]</sup>和微热板式气压传感器<sup>[3]</sup>等,这些传感器的应用有力推进了新的测试方法的进步和发展。接触式电容压力传感器的研究始于 20 世纪 90 年代,该类传感器是在普通的电容压力传感器的下电极上覆盖一薄层绝缘体,使其工作在接触状态,这样的结构赋予了该类传感器诸多的优点。如输入压力与输出电容在一定范围内呈线性关系,具有较大的压力范围和电容输出值,灵敏度高、有良好的过载保护能力等<sup>[4]</sup>。为了进一步改善接触式电容压力传感器的性能,本文设计了一种新型的传感器结构——双凹槽接触式电容压力传感器(Double-cave Touch Mode Capacitive Pressure Sensor,DTMCPS)。这种结构能够使传感器的线性工作范围成倍延伸,同时也能有效提高传感器的灵敏度<sup>[5-6]</sup>。

对于优秀的 MEMS 器件,高温性能是一个重要的指标。双凹槽接触式电容压力传感器因为尺寸微小、结构特殊、其机械和热参数发生很大的变化,因此对整个传感器的热特性有显著影响。本文介绍了双凹槽接触式电容压力传感器的工作原理和加工工艺,重点对各个机械参数和热参数与温度的依赖关系进行了研究,并综合分析了高温环境下该传感器的热特性。

## 2 DTMCPS 的原理及工艺过程

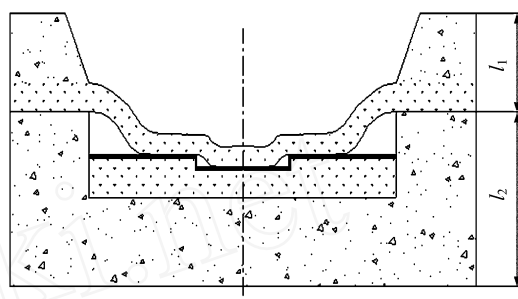
### 2.1 传感器结构

相比于一般的接触式电容压力传感器,DTMCPS 是在底部电极上额外加工了一个浅槽,如图 1 所示。图中: $h$  为上电极膜的厚度, $g$  为第一个浅槽的深度, $g_n$  为第二个浅槽的深度, $t_m$  为绝缘层的厚度, $r$  为上电极膜片(也即第一个浅槽)的半径, $r_n$  为第二个浅槽的半径, $R$  为传感器外围半径, $l_1$  为传感器上硅片的厚度, $l_2$  为传感器下硅片的厚度。



(a) 初始状态

(a) Initial state



(b) 接触状态

(b) Touch state

图 1 双凹槽接触式电容压力传感器的结构示意图

Fig. 1 Basic structure of DTMCPS

传感器为圆形结构,有上下两个电极,上电极是一个浓硼掺杂的硅膜片,同时也是一个变形膜片;下电极由大小两个浅槽组成,并覆盖了一薄层 SiO<sub>2</sub> 绝缘体,两个电极之间是一个真空腔室。当传感器处于正常状态,由于大气压的作用上电极膜片会产生微小变形,如图 1(a) 所示。当传感器处于工作状态,如图 1(b) 所示,被测压力将上电极膜片不断压向下电极,并与下电极上的绝缘层接触,通过测量上下电极之间的电容就能计算出压力的大小。由于第二个浅槽的存在,当上电极接触到第一个浅槽以后,第二个浅槽范围内的上电极膜片将继续变形,这样就能大大增加传感器的线性工作范围,同时又能提高传感器的灵敏度。

### 2.2 传感器的工艺过程

双凹槽接触式电容压力传感器采用了硅-硅直接键合技术。

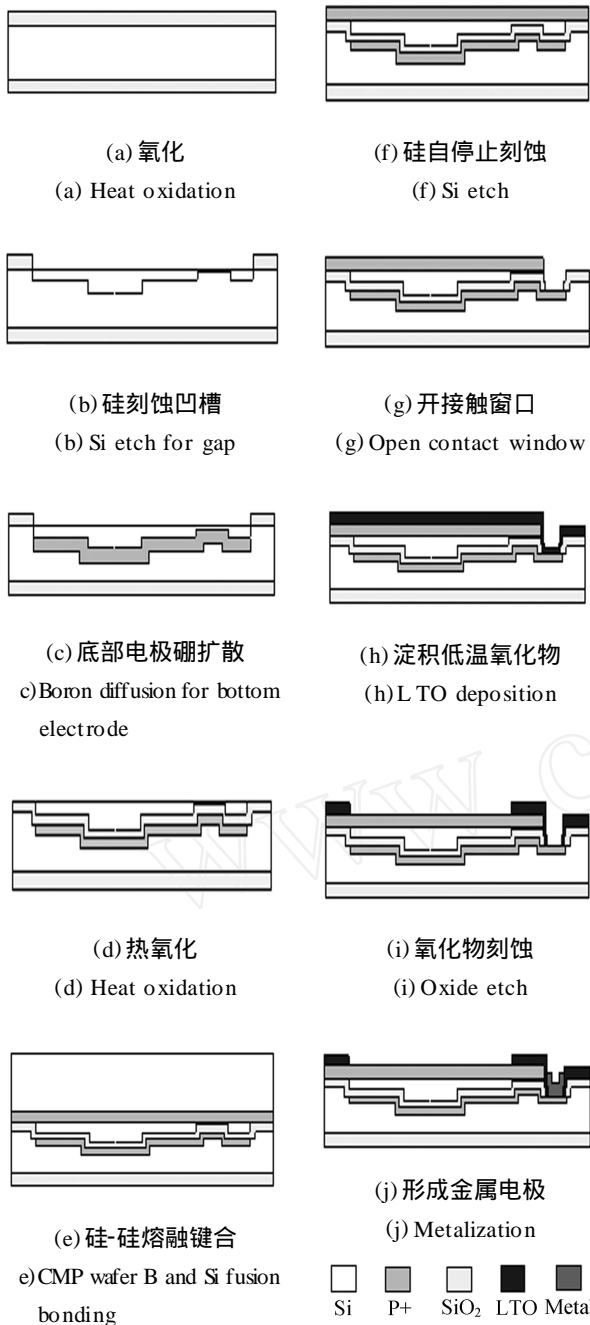


图 2 双凹槽接触式电容压力传感器的工艺过程

Fig. 2 Process outline of silicon fusion bonded DTMCPs

首先,准备两个 100 方向的硅片 A 和 B,并热生长一层氧化层作为硅刻蚀掩蔽层,如图 2(a);然后用不同的掩模在硅片 A 上刻蚀连接浅槽、第一个凹槽和第二个凹槽,如图 2(b);之后在凹槽上进行浓硼扩散,形成底部电极,如图 2(c);接着,在底部电极上热生长一薄层 SiO<sub>2</sub> 作为绝缘层如图 2(d);对硅片 B 的一侧进行浓硼扩散,扩

散的厚度为上电极膜的厚度,然后进行硅熔融直接键合,如图 2(e);对硅片 B 的另一侧进行硅自停止刻蚀,并打开引出电极板窗口如图 2(f)、(g);然后在其上淀积一层低温氧化物(LTO)密封腔室,如图 2(h);去除电容器上极板和引出电极相应的 LTO,如图 2(i);最后在引出电极上溅射一薄层金属,形成欧姆接触,如图 2(j)。

### 3 DTMCPs 的热分析

对于受压力载荷和温度载荷共同作用的双凹槽接触式电容压力传感器,热传导和热弹性变形必须要综合考虑,而且所涉及参数与温度的依赖关系也将影响电容器的输入-输出特性。

#### 3.1 理论基础

对于上下电极板被固支的圆形电容器来说,当上电极受到外力发生变形,则电容器的输出电容将随之变化,其变化量可由下面的积分方程式计算:

$$C = \int_0^R \frac{2\pi r}{g - w(r)} dr, \quad (1)$$

式中:  $C$  为输出电容,  $R$  为电极板半径,  $r$  为径向坐标,  $\epsilon_0$  为两极板间的介电常数,  $g$  为两极板间距,  $w(r)$  为  $r$  处的法向挠度。

对于本文所研究的双凹槽接触式电容压力传感器,当压力达到接触压力之后,输出电容值由接触和非接触两部分组成,分别对应绝缘体和真空两个介电常数;同时,要分别考虑两个凹槽不同部分的输出值。那么对应于某一变形量的输出电容可以表示为:

$$C = \int_0^{r_1} \frac{2\pi \epsilon_0 \epsilon_a r dr}{t + i(g_n + g - w(r))} + \int_{r_1}^{r_2} \frac{2\pi \epsilon_0 \epsilon_a r dr}{t + i(g - w(r))}, \quad (2)$$

式中:  $\epsilon_0$  为真空介电常数,  $\epsilon_a$  为空气的介电常数,  $\epsilon_i$  为绝缘层的介电常数,  $t$  为绝缘层的厚度,  $g$  为第一个凹槽的深度,  $g_n$  为第二个凹槽的深度,  $r$  为第一个凹槽的半径,  $r_1$  为第二个凹槽的半径,  $r_2$  为  $r_1 \sim r$  的径向坐标,  $w(r)$  为  $r$  处的法向挠度,  $w(r_2)$  为  $r_2$  处的法向挠度。

对于上式来说,要得到输出电容,必须要知道外部压力和温度载荷共同作用下膜片的变形情

况。由平板的热弯曲理论,变形的积分方程可表示为<sup>[7]</sup>:

$$D \left[ \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^2 w}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} \right] = p - (1 - \nu) D \left[ \frac{\partial^2 m}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 m}{\partial y^2} \right] + N_x \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + 2 N_{xy} \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} + N_y \frac{\partial^2 w}{\partial y^2}, \quad (3)$$

式中:  $w$  为膜的变形量,  $p$  为外部压力载荷,  $m$  为温度矩,  $D$  为弯曲刚度,  $D = \frac{12}{h^3} \int_{-h/2}^{h/2} z dz$  为温度矩,  $D$  为弯曲刚度,  $D = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)}$ ,  $E$  为杨氏模量,  $h$  为膜的厚度,  $\nu$  为泊松比,  $\alpha$  为热膨胀系数,  $N_x, N_{xy}, N_y$  分别是膜片单位长度的正应力和剪应力。

从式(3)可以看出,温度对变形量的影响,主要是等式右边第二项中的  $m$  和  $\alpha$ 。而对于  $m$ , 利用基于傅里叶定律的热传导方程,传感器内部的温度分布可以表示为<sup>[8]</sup>:

$$c_p \frac{\partial}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \kappa_{xx} \frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \kappa_{yy} \frac{\partial}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} \kappa_{zz} \frac{\partial}{\partial z} + g(x, y, z, t), \quad (4)$$

式中:  $\rho$  为密度,  $c_p$  为比热容,  $\kappa$  为热导率,  $T(x, y, z, t)$  为内部温度分布,  $x, y, z$  分别为 3 个轴向坐标,  $g(x, y, z, t)$  为热生成率,  $t$  为时间。

传感器在测量高温环境中的压力时,一般属于稳态传热过程,那么热传导方程将与时间无关。所以对于式(4)来说,微分方程将简化为:

$$\frac{\partial}{\partial x} \kappa_{xx} \frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \kappa_{yy} \frac{\partial}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} \kappa_{zz} \frac{\partial}{\partial z} + g(x, y, z) = 0, \quad (5)$$

综合式(2)、(3)、(5),输入量与输出量,即外部压力和温度载荷与输出电容值之间将建立起一定的关系。

### 3.2 各影响因素的温度依靠

考虑式(3)和(5),影响变形量  $w$  的因素主要有:  $E, \nu$  和  $\alpha$ 。而这几个参数都有不同程度的温度依靠。

硅的热导率对温度非常敏感,同时与硅的厚度、掺杂浓度和掺杂物质也息息相关。对于浓硼扩散的硅薄膜来说,由于边界散射,声子平均自由程将大大减小,这样热导率也随之大降低<sup>[9]</sup>。从声子热传导的一般方程<sup>[10]</sup>,可以总结出硅薄膜的热传导方程<sup>[11]</sup>,其表达式为:

$$= \frac{1}{3} \sum_{j=L, T, TU} \int_0^T C_{v,j}(x) v_j(x) dx, \quad (6)$$

式中:  $T, TU$  和  $L$  分别代表低频、高频横向模式以及纵向模式,  $v_j$  为声子群速度,  $T$  为德拜温度,  $C_v$

为单位体积的比热,  $\omega$  为无量纲频率。

参考 M. Asheghi<sup>[12-13]</sup> 和 Wenjun Liu<sup>[9]</sup> 等人的研究成果,并依据式(6),可以预测浓硼掺杂硅薄膜(厚 4  $\mu\text{m}$ , 掺杂浓度为  $1.0 \times 10^{20}$  atoms/ $\text{cm}^3$ ) 在 200 ~ 600 K 的热传导系数,图 3 显示了综合分析后热传导系数和温度的关系。而体硅的热传导系数与温度的关系则参考了 H. F. Wolf<sup>[14]</sup> 的研究成果,也显示在图 3 中。

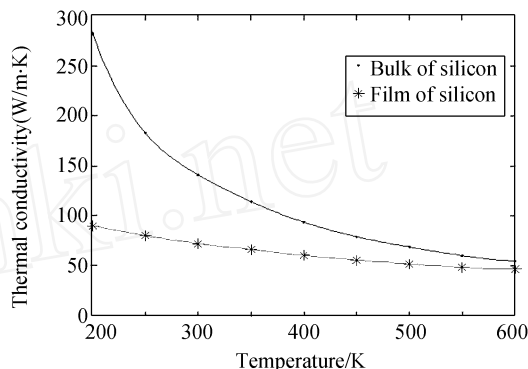


图 3 体硅和浓硼掺杂硅膜片(4  $\mu\text{m}$  厚,掺杂浓度为  $1.0 \times 10^{20}$  atoms/ $\text{cm}^3$ )的导热系数与温度的关系

Fig. 3 Thermal conductivities of bulk silicon and boron doped Si film as functions of temperature (thickness of 4  $\mu\text{m}$  and concentration of  $1.0 \times 10^{20}$  atoms/ $\text{cm}^3$ )

二氧化硅薄膜的热导率主要取决于不同的淀积方式,热生长的  $\text{SiO}_2$  薄膜的热导率要比溅射的高 20%<sup>[15]</sup>,同时,热生长的  $\text{SiO}_2$  薄膜的热导率几乎等于体二氧化硅的热导率<sup>[16]</sup>。参考马庆芳等人的著作<sup>[17]</sup>,二氧化硅薄膜的热导率与温度的关系示于图 4。

图 5 为硅和二氧化硅的热膨胀系数与温度的关系。它们分别参考了马庆芳等人的著作<sup>[17]</sup>以及国标中相应的数据<sup>[18]</sup>。

Kahn 等人对硅的弹性模量与温度的依据关系进行了研究<sup>[19]</sup>,图 6 为硅的弹性模量与温度的关系。Weihs 等人报道了二氧化硅的弹性模量为 64 GPa<sup>[20]</sup>,并且随着温度的升高几乎不发生变化<sup>[21]</sup>的结论。

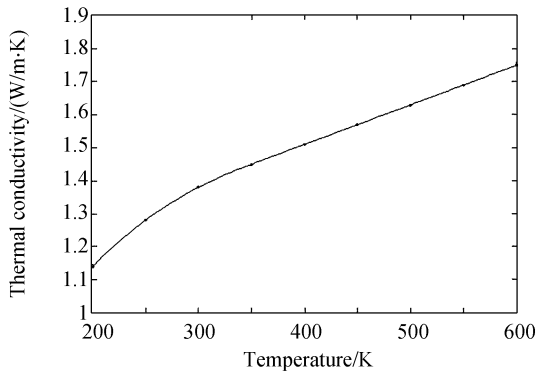


图 4 热生长二氧化硅的导热系数与温度的关系  
Fig. 4 Thermal conductivity of thermally grown SiO<sub>2</sub> film as a function of temperature

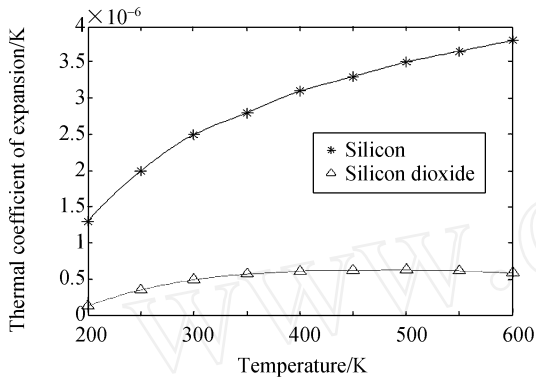


图 5 硅和二氧化硅的热膨胀系数与温度的关系  
Fig. 5 Thermal expansion coefficients of Si and SiO<sub>2</sub> as functions of temperature

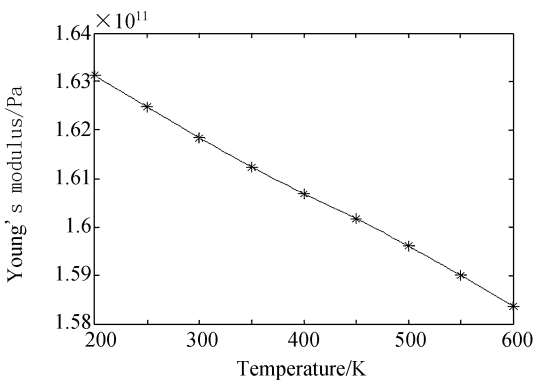


图 6 硅的杨氏模量与温度的关系  
Fig. 6 Young's modulus of silicon as a function of temperature

### 3.3 有限元模拟及分析

在非线性分析中,有限元模拟是一个重要且有效的方法。用 ANSYS 有限元分析软件对整个

传感器的热-机械性能进行分析,可得到传感器的输入-输出关系。进行分析时,必须对整个传感器进行建模;同时,传感器模型的各个尺寸必须首先确定,以避免形状对传感器性能的影响。传感器各部分尺寸为: $h = 4 \mu\text{m}$ ,  $g = 4 \mu\text{m}$ ,  $g_n = 1 \mu\text{m}$ ,  $t_m = 0.35 \mu\text{m}$ ,  $r = 250 \mu\text{m}$ ,  $r_n = 90 \mu\text{m}$ ,  $R = 400 \mu\text{m}$ ,  $l_1 = 20 \mu\text{m}$ ,  $l_2 = 200 \mu\text{m}$ 。边界条件为:传感器底部全约束,初始温度定义为 300 K(即室温)。

在有限元分析时,考虑各种影响因素与温度的依赖关系,并在传感器的上极板膜片上施加不同的压力和温度,通过热-机械耦合分析,得到了整个传感器的变形量;同时,结合式(2)得到了传感器的输出电容。图 7、8、9 分别显示了 1 MPa 压力和 550 K 温度载荷下(即接触状态),上膜片的变形以及整个传感器的应力分布和温度分布。

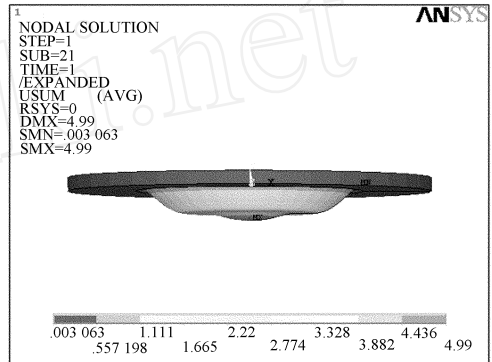


图 7 1 MPa 和 550 K 载荷下上硅片的变形  
Fig. 7 Displacement vector sum of whole upper wafer at 1 MPa and 550 K

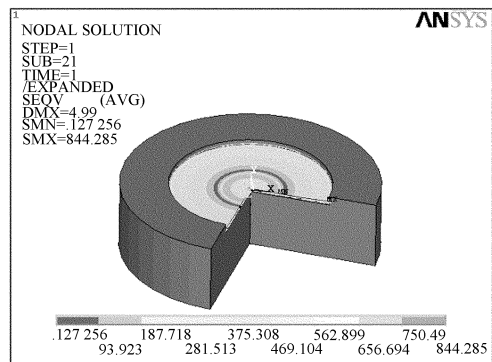


图 8 1 MPa 和 550 K 载荷下传感器的应力  
Fig. 8 Von mises stress of 3/4 DTMCPs at 1 MPa and 550 K

压力载荷分别设置为 3 kPa(非接触状态)、1 MPa 和 2 MPa(接触状态)时,随着温度载荷的升

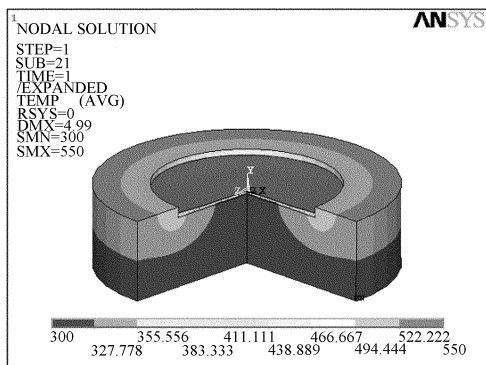


图 9 1 MPa 和 550 K 载荷下传感器的温度分布

Fig. 9 Body temperature of 3/4 DTMCPs at 1 MPa and 550 K

高,输出电容量将发生变化。图 10 显示了非接触状态的变化曲线;图 11 显示了接触状态的变化曲线。

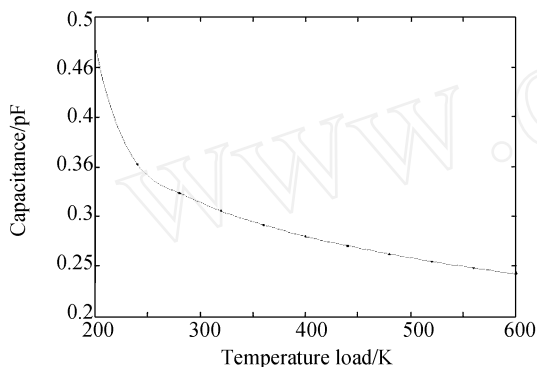


图 10 非接触状态 3 kPa 下输出电容与温度的关系

Fig. 10 Output capacitance of DTMCPs as a function of temperature under 3 kPa on untouched state

当温度载荷分别设置为:200,300,400,550 K 时,随着压力载荷的增加,输出电容也将随之变化。图 12 显示了这种变化曲线。同时,550 K 下,传统的单凹槽接触式电容压力传感器的输入-输出曲线也显示其中。

从图 10 可以看出,在传感器的非接触状态,输出电容量随温度载荷的升高而降低,这是由于膜片在高温下产生了“热屈曲”,使上膜片不断向上拱起,从而拉大了两极板间的距离,促使两极板间电容不断减小。

从图 11 和 12 可以看出,在传感器的接触状态(即工作状态),输出电容量与输入压力和温度载荷都呈线性关系,说明温度对输入(压力)-输出

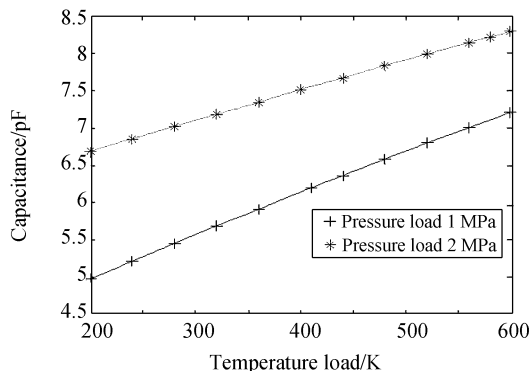


图 11 接触状态 1 MPa 和 2 MPa 下输出电容与温度的关系

Fig. 11 Output capacitances of DTMCPs as functions of temperature load under 1 MPa and 2 MPa on touched state

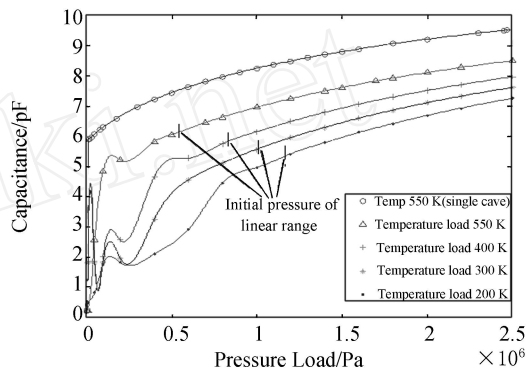


图 12 200,300,400 和 550 K 下输出电容与压力载荷关系曲线,以及 550 K 下单凹槽结构的输入输出关系

Fig. 12 Output capacitance of DTMCPs as functions of pressure under temperature 200,300,400 and 550 K, and input-output curves of TM-CPS under 550 K

(电容量)之间关系的影响是线性的,而这样的线性关系赋予了该传感器优越的高温特性,使得在一个很宽的温度范围内被测压力的测量值能够更直接的反应实际值,从而更加趋近于实际值,这对于优秀的 MEMS 器件是非常重要的。

从图 12 还可以看出,线性范围的初始压力随着温度载荷的升高而不断下降,也就是说,传感器的线性工作范围在不断扩展。测量其线性范围内的灵敏度:200 K 时为  $1.4 \times 10^{-6}$  pF/Pa,300 K 时为  $1.36 \times 10^{-6}$  pF/Pa,400 K 时为  $1.29 \times 10^{-6}$  pF/Pa,550 K 时为  $1.21 \times 10^{-6}$  pF/Pa,即随着温度载荷的增加,灵敏度变化不大。但是,对比传统

的接触式压力传感器(一个凹槽)可以看到,在相同温度载荷(550 K)下,传统的灵敏度为  $0.8 \times 10^{-6}$  pF/Pa,只相当于 DTMCPS 的 2/3。因此,本文所研究传感器的高温特性是非常优秀的。

图 13 显示了 550 K 温度载荷下,传感器从非接触状态到接触状态输出电容量的变化曲线。从图中可以看出,输出电容随压力升高呈阶梯状增加。当压力载荷达到 13.8 kPa 时,输出电容有一个突变,表明压力载荷突破了由温度引起的热屈

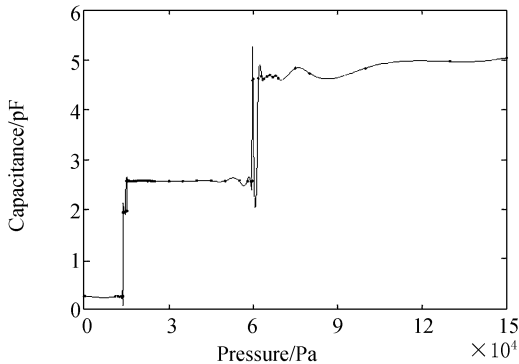


图 13 550 K 下传感器从非接触到接触状态输出电容与压力载荷的关系

Fig. 13 Output capacitance of DTMCPS as a function of pressure under 550 K from untouched to touch state

#### 参考文献:

- [1] 温志渝,温中泉,徐世六,等.真空微电子压力传感器的研制[J].光学精密工程,2004,12(6):603-607. WEN ZH Y, WEN ZH Q, XU SH L, et al.. Vacuum microelectronic pressure sensor [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2004,12(6):603-607. (in Chinese)
- [2] 肖韶荣,朱平,贾富来.光纤气压传感器特性分析[J].光学精密工程,2008,16(6):1042-1047. XIAO SH R, ZHU P, BEN FL. Analysis on characteristics of optical fiber sensor for atmospheric pressure [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008,16(6):1042-1047. (in Chinese)
- [3] 张凤田,唐祯安,高仁璟,等.微热板式气压传感器结构设计和热分析[J].光学精密工程,2004,12(6):598-602. ZHANG F T, TANG ZH A, GAO R J, et al..

曲临界值,使上膜片与第二个凹槽接触;在压力载荷达到 60 kPa 时,出现第二个突变,表明上膜片与两个凹槽都有了接触,之后,随着压力载荷的升高,输出电容会连续的增加。在其他的温度下,也将出现相似的过程。这一过程是由压力载荷和热屈曲共同作用导致的。

## 4 结 论

通过对接触式电容压力传感器的分析,设计了一款高性能的双凹槽接触式电容压力传感器,并对该传感器的高温特性进行了热分析。在分析过程中,引入了各影响因素与温度的依赖关系,并使用有限元方法对整个传感器的热-机械性能进行了模拟。模拟结果表明,在接触工作状态,该传感器的输出电容量与压力和温度载荷基本都呈线性关系,也就是说增加一个温度系数就能建立起输入-输出关系;而且线性范围得到了进一步扩展,传感器的灵敏度比传统单凹槽结构的  $0.8 \times 10^{-6}$  pF/Pa 提高了近 0.5 倍,达到了  $1.21 \times 10^{-6}$  pF/Pa,说明双凹槽接触式电容压力传感器有很好的高温性能。同时,此次分析对其他在高温环境中使用的 MEMS 器件的设计是一个很好的借鉴。

- Design and thermal analysis of gas pressure sensor with micro-hotplate [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2004,16(6):598-602. (in Chinese)
- [4] WANG Q, KO W H. Modeling of touch mode capacitive sensors and diaphragms [J]. *Sensors and Actuators A*, 1999,75:230-241.
- [5] LV H J, GUO Q, HU G Q. A touch mode capacitive pressure sensor with long linear range and high sensitivity [C]. *3rd IEEE International Conference of Nano/Micro Engineered and Molecular Systems, Sanya, China, 2008:796-800.*
- [6] 郭强,吕浩杰,胡国清.新型接触式电容压力传感器[J].仪表技术与传感器,2008(3):1-3. GUO Q, LV H J, HU G Q. New kind of touch mode capacitive pressure sensor [J]. *Instrument Technique and Sensor*, 2008(3):1-3. (in Chinese)
- [7] PARKUS H. *Thermoelasticity* [M]. 2nd ed. New

- York: Springer Press, 1976.
- [8] 蔡永恩. 热弹性问题的有限元方法及程序设计[M]. 北京: 北京大学出版社, 1997.
- CAI Y E. *Finite Element Method and Program Design of Thermoe Elasticity* [M]. Beijing: Peking University Press, 1997. (in Chinese)
- [9] LIU W J, ASHEGHI M. Thermal conduction in ultrathin pure and doped single-crystal silicon layers at high temperatures [J]. *Journal of Applied Physics*, 2005, 98(123523): 1-6.
- [10] BERMAN R. *Thermal Conduction in Solids* [M]. London: Oxford University Press, 1976.
- [11] HOLLAND M G. Analysis of lattice thermal conductivity [J]. *Physical Review*, 1963, 132(6): 2461-2471.
- [12] ASHEGHI M, TOUZELBAEV M N, GOODSON K E, et al.. Temperature-dependent thermal conductivity of single-crystal silicon layers in SOI substrates [J]. *Journal of Heat Transfer*, 1998, 120: 30-36.
- [13] ASHEGHI M, KURABAYASHI K, KASNAVI R, et al.. Thermal conduction in doped single-crystal silicon films [J]. *Journal of Applied Physics*, 2002, 91(8): 5079-5088.
- [14] WOLF H F. *Silicon Semiconductor Data* [M]. Oxford: Pergamon Press, 1969.
- [15] LEE S M, DAVID G C, THOMAS H A. Thermal conductivity of sputtered oxide films [J]. *Physical Review B*, 1995, 52(1): 253-257.
- [16] DAVID G C, KATIYAR M, ABELSON J R. Thermal conductivity of  $\alpha$ -Si: H thin films [J]. *Physical Review B*, 1994, 50(9): 6077-6082.
- [17] 马庆芳, 方荣生, 项立成, 等. 实用热物理性质手册[M]. 北京: 中国农业机械出版社, 1986.
- MA Q F, FANG R SH, XIANG L CH, et al.. *Practical Handbook of Thermophysical Properties* [M]. Beijing: Chinese Agricultural Machinery Press, 1986. (in Chinese)
- [18] GB/T 4339-1999, 金属材料热膨胀特性参数测量方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2000.
- GB/T 4339-1999, Testing method for thermal expansion characteristic parameters of metallic materials [S]. Beijing: Standards Press of China, 2000. (in Chinese)
- [19] KAHN H, HUFF M A, HEUER A H. Heating effects on the young's modulus of films sputtered onto micromachined resonators[C]. *Materials Research Society Symposium Proceedings, San Francisco, U. S. A*, 1998: 33-38.
- [20] WEIHS T P, HONG S, BRAVMAN J C, et al.. Mechanical deflection of cantilever microbeams: a new technique for testing the mechanical properties of thin films [J]. *Materials Research Society*, 1988, 3: 931-942.
- [21] HARUNA T, AMY E K, RICHARD E L, et al.. Thermal expansion coefficient of polycrystalline silicon and silicon dioxide thin films at high temperatures [J]. *Journal of Applied Physics*, 2000, 87(9): 4189-4293.

#### 作者简介:



吕浩杰(1979-),男,河南郑州人,博士研究生,2006年于新疆大学获得硕士学位,主要从事微/纳传感与测试技术、MEMS技术、机电一体化等方面的研究。E-mail: hoiselv@yahoo.com.cn



邹卫(1968-),男,四川南充人,博士研究生,工程师,1990年于西北工业大学获得学士学位,1997年于厦门大学获得硕士学位,主要从事自动化系统检测、图像识别技术等方面的研究。E-mail: zouwei1986@yahoo.com.cn





吴灿云(1984 - ) ,男,福建泉州人,硕士研究生,2007 年于福州大学获得学士学位,主要从事机电一体化等方面的研究。E-mail: wuzeshan @yahoo. com. cn



陈羽锋(1984 - ) ,男,四川南充人,硕士研究生,2008 年于江南大学获得学士学位,主要从事计算机辅助设计、机电一体化等方面的研究。E-mail: chen-yufeng1984 @126. com

#### 导师简介:



胡国清(1964 - ) ,男,四川人,教授,博士生导师,1987、1990 年于西北工业大学分别获得学士和硕士学位,1993 年于成都科技大学获得博士学位,主要从事高温检测与高温传感器、微机电系统(MEMS)、工业自动化与工业机器人、流体传动与控制机电一体化与自动化装备技术等方面的研究。E-mail: gqhu @xmu. edu. cn

(本栏目编辑:李树军)

#### 下期预告

## 全交叉光互连网络路由选择与控制设计

杨俊波<sup>1</sup>, 杨建坤<sup>1</sup>, 李修建<sup>1</sup>, 刘菊<sup>1</sup>, 苏显渝<sup>2</sup>, 徐平<sup>3</sup>

- (1. 国防科学技术大学 理学院 技术物理研究所, 湖南 长沙 410073;
2. 四川大学 电子信息学院 光电科学技术系, 四川 成都 610064;
3. 深圳大学 电子科学与技术学院, 广东 深圳 518060)

自由空间光互连网络在光通信、光信息处理和光计算中具有重要的应用。为了解决全交叉光互连网络中光信号路由选择和控制的问题,提出和设计了基于矩阵运算的路由算法。首先,根据全交叉网络的链路函数和连接规则,得到光信号变换矩阵,将光互连网络对信号的传输与处理,等效为对输入信号阵列的矩阵运算,建立输入/输出信号间的关系;接着,根据输入输出信号阵列实现各级节点开关状态的确定;最终,完成了信号光的路由判断和控制。分析和讨论表明:该算法不仅解决了 8 × 8 全交叉网络的路由控制问题,而且对全混洗、榕树网等规则互连网络也具有良好的移植性和兼容性,具有稳定性高、操作性强、易扩容等特点,能够满足 16 × 16、32 × 32、64 × 64 等大端口光互连网络的路由确定和控制。