

## The Research of a Micro-Silicon Integrated Multi-Sensor<sup>\*</sup>

ZHAO Yu-long<sup>\*</sup>, XU Jing-bo, JIANG Zhuang-de, SUN Jian  
(Institute of Precision Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

**Abstract :** A micro-silicon integrated multi-sensor including three-axis accelerometers, an absolute pressure sensor and a temperature sensor is described. The purpose application of the integrated sensor meets the demands of little volume and multi parameters. The interference between sensors each other is eliminated because of the design of the integrated structure and the detected circuit. The three axis accelerometers and absolute pressure sensor use a bulk micromachined diaphragm structure with piezoresistors. For temperature sensing, a silicon temperature sensor is fabricated based on the spreading resistance principle. The size of the integrated multi-sensor is 4 mm × 6 mm × 0.9 mm. The test results of the integrated sensor are shown.

**Key words :** integration; multi-sensor; micro-silicon; interference

**EEACC :** 7230; 2575

## 一种硅微多传感器集成研究<sup>\*</sup>

赵玉龙<sup>\*</sup>, 徐敬波, 蒋庄德, 孙 剑

(西安交通大学精密工程研究所, 西安 710049)

**摘 要 :** 为满足小体积、多参数测量的要求, 利用(100)晶面的各向异性压阻特性与 MEMS 加工工艺特性, 在单芯片上集成制作了三轴加速度、绝对压力以及温度等硅微传感器, 在结构和检测电路设计上最大限度地减小各传感器之间的相互干扰影响。三轴加速度、绝对压力传感器利用压阻效应导致的电阻变化测量外界加速度和压力变化量, 温度传感器利用掺杂单晶硅电阻率随温度变化的原理来测量外界温度。集成传感器具有较好的工艺兼容性, 加速度、压力传感器的压敏电阻和温度传感器的测温电阻采用硼离子掺杂制作, 加速度和压力传感器设计成工艺兼容的体硅结构。研制的集成传感器芯片尺寸为 4 mm × 6 mm × 0.9 mm。给出了集成传感器的性能测试结果。

**关键词 :** 集成; 多传感器; 微硅; 干扰

**中图分类号 :** T212; TN402

**文献标识码 :** A

**文章编号 :** 1004-1699(2008)03-0404-04

在航空航天、军事、汽车、环境监测等领域中, 由于环境适应性、体积、成本和功能等的严格限制, 要求传感器具有微型化、集成化、多功能的特点。随着 MEMS 技术、半导体技术和集成电路技术的发展, 为传感器实现集成化、微型化提供了有力的技术路线保证。国内外先后开展以 MEMS 技术为核心的传感器集成技术研究。如日本 Hokuriku 电子公司于 2004 年开展 4mm 半导体芯片上集成三自由度加速度传感器研究; 韩国 Samsung 电子公司与西安

交通大学合作于 2004 年开始开展适合于手机应用的压力、温度和湿度传感器集成研究; 在国内也有开展用于气压、温度、湿度和风速等气象参数测量的集成传感器的报道。MEMS 集成传感器特点是可以减小体积, 减轻质量, 降低功耗, 且多功能化和易于加工。

针对微型惯性测量单元和汽车轮胎压力测试系统中, 对传感器提出的小体积、多参数和低功耗测量的要求, 本文利用(100)晶面的各向异性压阻特性与

**基金项目 :** 国家自然科学基金资助(50535030, 50475085); 教育部“新世纪优秀人才支持计划”资助(NCET-05-0842); 国际合作资助(2006DFA73620)

**收稿日期 :** 2007-09-30 **修改日期 :** 2008-01-07

MEMS 加工工艺特性,在单芯片上集成制作了三轴加速度、绝对压力以及温度等硅微传感器,在结构和检测电路设计上最大限度地减小各传感器之间的相互干扰影响。其中三轴加速度计、绝对压力传感器利用压阻效应导致的电阻变化测量外界加速度和压力变化量<sup>[1]</sup>,温度传感器利用掺杂单晶硅电阻率随温度变化的原理来测量外界温度<sup>[2]</sup>。为保证集成传感器的工艺兼容性,加速度、压力传感器的压敏电阻和温度传感器的测温电阻采用硼离子掺杂制作,加速度和压力传感器设计成工艺兼容的体硅结构<sup>[3]</sup>。

### 1 集成传感器结构设计

结构设计对于提高集成芯片的灵敏度具有极其重要的意义。集成传感器中压力传感器采用 C 型硅杯结构,三轴加速度传感器采用四悬臂梁支撑中心质量块结构,温度传感器则使用沿 [100] 或 [010] 晶向的锯齿形扩散电阻测温。为保证各量程下传感器的线性和精度,设计的 SOI 压阻的测量应变值为硅应变极限的。半导体硅电阻的制作要从各个环节保证四个电阻的一致性,以减少零位电压及温漂,提高线性。集成传感器的结构如图 1 所示。

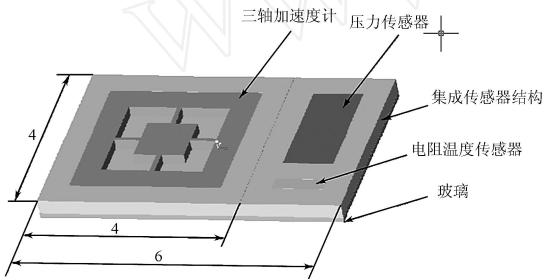


图 1 集成传感器结构

#### 1.1 集成传感器中三轴加速度传感器结构设计

集成三轴加速度计采用相互垂直的四个悬臂梁支撑中间的质量悬块和起过载保护作用的 pyrex 玻璃基底构成。四个悬臂梁相互垂直,在各悬臂梁上通过离子注入形成扩散电阻,将各扩散电阻通过连接分别构成检测三个垂直方向加速度的对独立的惠斯通电桥测量电路,以获得三轴加速度及其之间的相对独立的测量技术,提高三轴加速度传感器之间抗干扰的能力<sup>[4]</sup>。其将外部作用力转化并解耦为 X, Y, Z 方向的电信号,同时获得最大的灵敏度和最小的 X, Y, Z 各轴的交叉干扰。集成传感器中三轴加速度传感器的结构示意图如图 2 所示。为了更好的利用压阻效应和提高测量灵敏度,硅基采用 (100) 晶面硅,利用 (100) 硅压阻系数沿 [110] 和 [110] 晶向具有最大值,沿 [100] 和 [010] 晶向压阻系数几乎为零的特点,设计的压阻条方向沿 [110] 或 [110] 晶向。

当传感器受到外界加速度  $a$  时,质量块  $m$  会把加速度转化为惯性力  $F = ma$ ,使悬臂梁发生形变,在梁上产生相应的应力,应力变化导致扩散电阻的阻值发生变化,最后由惠斯通电桥输出相应电压的变化。键合的玻璃基底和活动的质量悬块之间必须留出一定的活动空间,保证传感器的正常工作,同时能提供传感器的高过载限位保护。

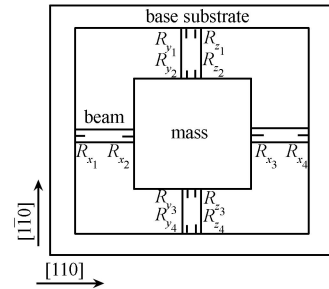
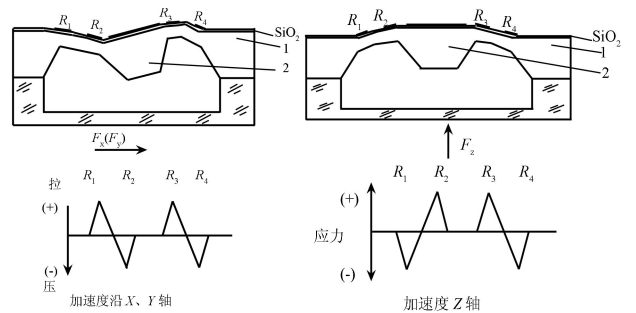


图 2 三轴加速度计结构及悬臂梁上压阻条布置

图 3(a) 为质量块受到 X(或 Y) 方向作用加速度时,传感器悬臂梁受力和应力状态分布。图 3(b) 为质量块受到 Z 方向的加速度用时,悬臂梁受力状态和应力分布状态。正是由于悬臂梁受到 X(或 Y) 方向和 Z 方向加速度时,在悬臂梁上产生的应力分布的差异,结合惠斯登测量电桥的测量特点,通过压阻条的组桥方式,来区分各方向的测量加速度的大小。



(a) X、Y 向加速度作用下传感器应力分析 (b) Z 向加速度作用下传感器应力分析

图 3 加速度传感器受力及应力分析

由图 3 悬臂梁的应力分布可以知道,通过合理的布置压阻参数和组桥方式,可以消除加速度之间的相互干扰。图 4 为悬臂梁上压阻 X、Y 和 Z 方向测量电桥组桥方式示意图。当三轴加速度计的质量块受到如图 3(a) 所示的 X 或 Y 方向的加速度时,在对应的悬臂梁处产生如图 3(a) 的应力分布。由图 4 所示的 X 或 Y 的惠斯登测量电桥的桥臂电阻  $R_1$  和  $R_3$  沿增大方向变化, $R_2$  和  $R_4$  沿减小方向,在 X 或 Y 的惠斯登测量电桥上即可输出与被测加速度大小成比例的信号;此时虽然同样的 3(a) 的应力分布作用在沿 Z 的测量电桥上,但由于图 4 中 Z 方向的组桥特点,导致 Z 向测量电桥桥臂电阻  $R_{z1}$  和  $R_{z3}$  沿增大

方向变化,  $R_{z_2}$  和  $R_{z_4}$  沿减小方向, 所以此时在  $z$  方向的测量电路上没有活又较小输出。同样, 测量  $z$  向加速度时, 在  $x$  或  $y$  向测量电路有同样的分析结论。三轴加速度传感器就是在有限的体积范围内, 结合结构和测量电路的设计, 实现三维加速度的区分与测量。

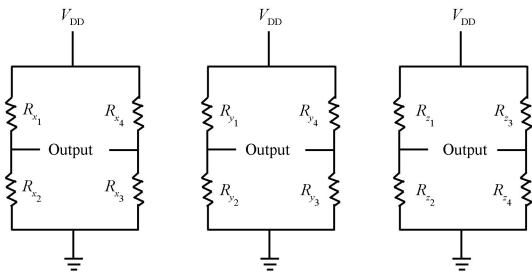


图4 x, y, z方向的测量电桥示意图

在加速度设计量程为 100 gn 情况下, 通过优化三轴加速度传感器的悬臂梁的长、宽和厚度尺寸分别为 450  $\mu\text{m}$ , 150  $\mu\text{m}$  和 25  $\mu\text{m}$ ; 中间质量块的尺寸 960  $\mu\text{m}$   $\times$  960  $\mu\text{m}$ 。

### 1.2 集成传感器中压力传感器结构设计

集成传感器中压力传感器利用 C 型硅杯结构测量压力。硅杯与玻璃基底进行阳极键合形成真空腔, 四个压敏电阻布置在硅膜的四周应力最大的区域。压力传感器结构如图 5 所示。压力传感部件的压敏电阻布置方向沿  $[110]$  和  $[\bar{1}\bar{1}0]$  晶向分布以获得最大的压阻系数。设计的正方形压力传感器的膜结构尺寸为: 1 000  $\mu\text{m}$   $\times$  1 000  $\mu\text{m}$   $\times$  25  $\mu\text{m}$ 。在 200 kPa 的压力下正方形压力膜的应力分布如图 6。

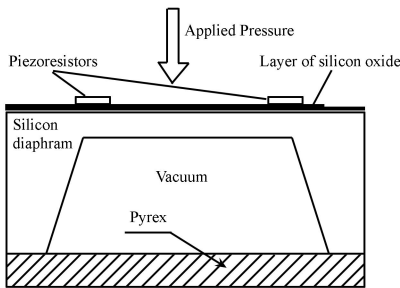


图5 正方形压力传感器结构

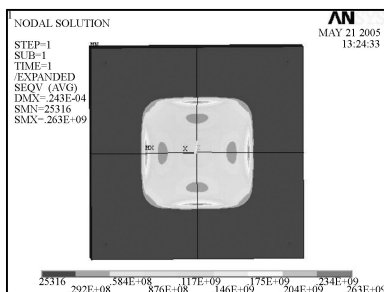


图6 压力传感器压力膜的应力分布

### 1.3 温度传感器结构设计

温度传感器结构的设计, 如图 7 所示, 利用掺杂电阻的阻值与温度的变化关系来测温: 掺杂电阻的电阻率主要取决于载流子的浓度和迁移率, 在一定的温度范围内载流子的浓度主要由掺杂浓度决定与温度无关, 而载流子的迁移率则随温度的变化而变化。温度传感部件是通过硼离子注入形成 P 型电阻作为测温元件。SOI 硅片的采用, 大大减少了由于 P-N 结隔离导致的电阻非线性。与加速度、压力测量的情况相反, 为了避免外部应力对测温电阻的影响, 沿  $[100]$  或  $[010]$  晶向的锯齿形扩散电阻能最大限度的减少干扰应力对阻值的影响。

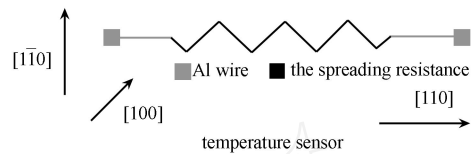


图7 温度传感器结构设计

## 2 实验与结果

设计制作的集成传感器芯片尺寸为 4 mm  $\times$  6 mm  $\times$  0.9 mm, 如图 8 所示。适合于微惯性测量单元的标准双列直插封装如图 9 所示。

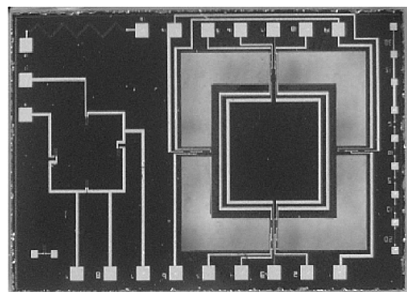


图8 研制的集成传感器芯片

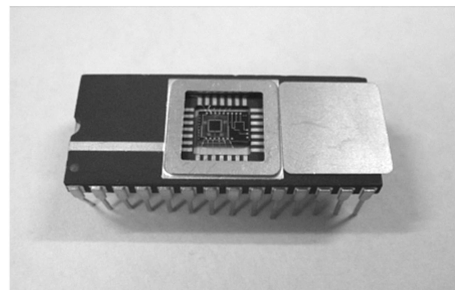


图9 集成传感器封装

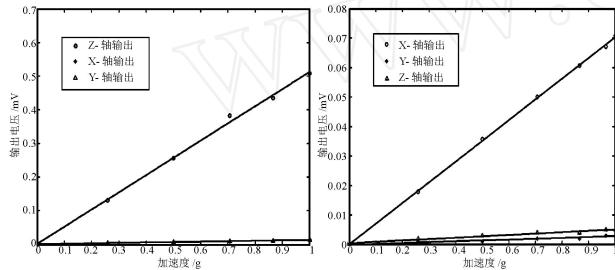
对研制的集成传感器性能进行了测试。三轴加速度计利用精密翻转台进行了测试。加速度计测量电路激励电压为 5V 恒压源, 在 0 ~ 1 gn 加速度作用下,  $z$  轴和  $x$  轴加速度计的输出特性曲线如图 10 (a) 和 (b) 所示。其中  $z$  轴加速度输出灵敏度为 0.508 mV/gn, 非线性度误差小于 2% FS;  $x$  轴加速

度计输出灵敏度为 0.070 1 mV/gn,非线性度误差为小于 1 %FS。三轴加速度计间的最大偏轴误差小于 5 %FS。

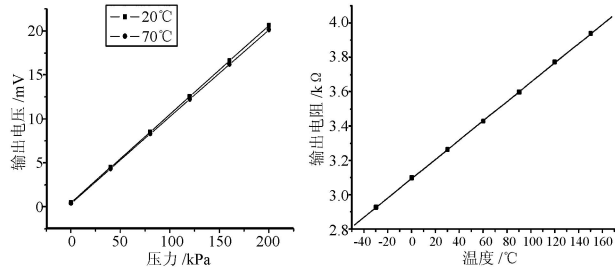
集成传感器中压力传感器的静态特性试验在浮球式压力实验台上进行测试。压力传感器的电桥激励电压为 5 V 恒压源供电,环境温度范围为 20 ~ 70 ,压力传感器的范围为 0 ~ 200 kPa。输出特性曲线如图 10(c)。压力传感器的测量灵敏度为 0.1 mV/kPa;线性度为 0.04 %FS。

温度传感器利用恒温测试箱进行测试,温度测量范围为-30 ~ 120 ,测试结果如图 10(d)所示。温度传感器的测量灵敏度为  $5.617 \times 10^{-3}$  k / ,非线性度为 0.48 %FS。

集成传感器的过载能力试验在高速离心试验转台上进行。在离心转速 0 ~ 1 800 rpm 范围内,对应的离心加速度范围为 0 ~ 800 gn。在离心转速达到 6 341 rpm(即加速度值 10,000 gn)后,待离心机转速下降到输出加速度在其量程范围,传感器仍有输出,说明加速度传感器结构没有破坏,设计的加速度计具有较好的过载保护能力。



(a) 为 z 轴加速度输入时, (b) 为 x 轴加速度输入时, 三轴加速度传感器的输出



(c) 压力传感器输出特性 (d) 温度传感器的输出

图 10 集成传感器的输出曲线

### 3 结论

本文采用 MEMS 技术,研制了一种硅微集成传感器芯片,包括三轴加速度计、绝对压力传感器和温度传感器。通过合理设计传感器的结构和布置压敏电阻和引线,可以消除传感器之间的相互影响,且加速度计结构具有较高的过载保护能力。研制的集成传感器芯片尺寸 4 mm ×6 mm ×0.9 mm。性能测试表明,研制的硅微多传感器集成芯片,具有较好的性能指标,可以满足微惯性测量单元中微型化、多参数的测量。

### 参考文献:

[1] Kanda Y. A Graphical Rrepresentation of the Piezoresistance Coefficients in Silicon[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 1982, 29(1):64.

[2] Arora N D, Hauser J R, Roulston D J. Electron and Hole Mobilities in Silicon as a Function of Concentration and Temperature[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 1982, 29(2):292.

[3] 徐敬波,赵玉龙,蒋庄德,基于 SOI 的集成硅微传感器芯片的制作,半导体技术学报[J],2007,28(2):74-78.

[4] 孙剑,赵玉龙,苑国英等,一种压阻式三轴加速度传感器的设计,传感技术学报,2006,19(5):2197-2199.



赵玉龙(1968-),男,2002 年 7 月毕业于西安交通大学获博士学位。现为西安交通大学机械工程学院教授、陕西省 MEMS 研究中心副主任,中国仪器仪表学会传感器分会常务理事、微纳器件与系统分会理事、传感技术学报编委,全国高校传感器技术研究会理事。主要从事 MEMS 传感器及其工艺研究,近年来,发表相关论文 50 余篇,获授权国家发明专利 14 项,zhaoyulong@mail.xjtu.edu.cn