

基于 SOI 的集成硅微传感器芯片的制作*

徐敬波^{1,†} 赵玉龙¹ 蒋庄德¹ 张大成² 杨芳² 孙剑¹

(1 西安交通大学机械制造系统工程国家重点实验室, 西安 710049)

(2 北京大学微电子学研究所, 北京 100871)

摘要: 为满足小体积、多参数测量的要求,采用 SOI 硅片,设计了一种测量三轴加速度、绝对压力、温度参数的单片集成硅微传感器,其中加速度、绝对压力传感器基于掺杂硅压阻效应,温度传感器基于掺杂硅电阻温度效应.根据集成传感器的结构,制定了相应的制备工艺步骤.针对芯片上各电阻间金属引线的可靠性问题和加速度传感器质量块吸附问题提出了有效的改进方法.最后给出了集成传感器芯片的性能测试结果.

关键词: 集成传感器; SOI; MEMS

PACC: 0630N; 6855; 8110

中图分类号: TS212.1

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2007)02-0302-06

1 引言

在航空航天、军事、汽车、环境监测等领域,经常需要同时测量加速度、压力、温度等参数.但在这些应用中,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.基于 MEMS 技术的集成传感器能够在同一芯片上集成多个不同的传感器,用以对不同的物理量同时进行检测,而且体积小,单位成本低,在上述领域具有潜在应用前景,因此受到国内外越来越多地关注.在国外,已经有用于环境监测^[1,2]、化学分析^[3]、生物保护^[4]等方面的集成 MEMS 传感器的介绍.在国内,也有用于气压、温度、风速、风向等气象参数测量^[5,6]的集成传感器报道.但是其中能够在较高温度环境下工作的集成 MEMS 传感器还报道的不多.为使集成传感器具有更好的温度适应性,可以选择 SOI 硅片作为加工材料. SOI 硅材料已经开始广泛应用于 MEMS 器件领域,这种材料在耐高温、低压、低功耗方面的优势可以使加工的 MEMS 硅传感器大幅提高对恶劣测量环境的适应能能力,拓展 MEMS 硅传感器的应用范围^[7].在 SOI 硅片上制作的扩散电阻利用 SOI 硅片的 SiO₂ 绝缘层与衬底隔离,避免了高温时普通硅片扩散电阻 p-n 结隔离而导致的漏电流的影响,从而具有更稳定的高温性质. Zhao 等人^[8]使用氧离子注入 SOI 硅片,采用 MEMS 体硅工艺成功制作了用于石油、化工领域的

耐高温压力传感器,而 Kyung 等人^[9]则使用硅-硅直接键合 SOI 硅片制作了耐高温环境的三轴加速度传感器.因此,本文利用(100)晶面的 4 寸硅-硅直接键合 SOI 硅片,制作了一种可以在较高温度环境下测量三轴加速度、绝对压力以及温度的集成硅微传感器,对影响集成传感器芯片性能的工艺步骤进行了改进,并给出了集成传感器的性能测试结果.

2 集成传感器芯片的设计

集成传感器芯片集成了三轴加速度、绝对压力和温度三种传感器.三轴加速度、绝对压力传感器是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的^[10].温度传感器是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的^[11].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,将加速度和压力传感器设计成工艺兼容的体硅结构.图 1 为设计的集成传感器芯片的结构剖面示意图.集成传感器芯片尺寸为 4mm×6mm×0.9mm,由上层 SOI 硅片和下层 PYREX 玻璃构成.

三轴加速度传感器的设计是利用四个相互垂直的单端固支硅悬臂梁支撑着中间的 movable 质量块敏感三个方向的加速度,如图 1 所示.设计的压敏电阻布置在四个悬臂梁端部的线性应力区,设计连接各电阻构成能检测 x, y, z 三个垂直方向加速度的惠斯登电桥,同时这三个电桥还能尽量避免不同方向加

* 国家自然科学基金(批准号:50535030,50475085),国家重点基础研究发展规划(批准号:2004CB619302)及教育部“新世纪优秀人才支持计划”(批准号:NCET-05-0842)资助项目

† 通信作者. Email: xjb0510@163.com

2006-07-18 收到,2006-10-07 定稿

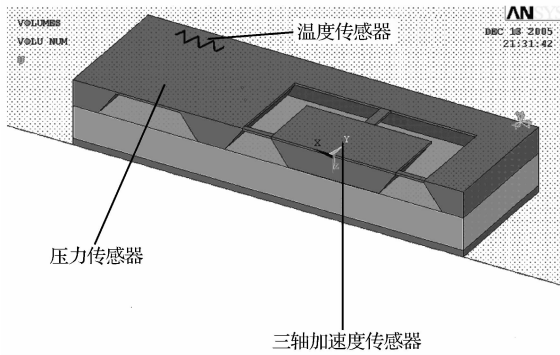


图 1 集成传感器的剖面结构示意图
Fig. 1 Structure diagram of multi-sensor

速度的干扰。底部的 PYREX 玻璃基底提供加速度传感器的支撑基底和高过载限位保护。

绝对压力传感器采用 C 型硅杯结构,如图 1 所示。压力传感器通过各向异性腐蚀制作出的正方形压力膜作为承压面,压敏电阻分布在压力膜四周边缘应力最大的区域连接形成惠斯登电桥。压力传感器的硅杯结构与 PYREX 玻璃基底通过阳极键合形成真空腔体,作为绝对压力传感器的压力参考。

温度传感器使用沿 $[100]$ 或 $[010]$ 晶向分布的锯齿形 p 型掺杂扩散电阻测温,结构如图 2 所示。通过调节扩散电阻的掺杂浓度可以使电阻具有良好的线性温度系数。为避免应力对温度传感器阻值的影响,在设计测温电阻时将电阻方向沿 $[100]$ 或 $[010]$ 晶向布置以获得最小的压阻系数^[10]。

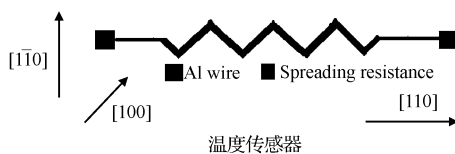


图 2 温度传感器结构示意图
Fig. 2 Structure diagram of the temperature sensor

3 集成传感器工艺

3.1 金属引线工艺

集成传感器中的敏感电阻具有不同于普通体硅电阻的浮雕式结构,压敏电阻和测温电阻突出在芯片的表面形成台阶形状,各电阻之间通过空气间隙进行隔离。按照常规的微电子金属 Al 引线工艺,芯片中浮雕式电阻的台阶结构将非常容易造成电阻接触区的金属引线断裂失效,而且金属 Al 引线在高温下也容易发生 Al-Si 溶解导致失效^[12]。为提高集成传感器中金属引线的可靠性,针对上述问题改进了

集成传感器金属引线工艺。集成传感器的金属引线采用物理气相沉积(PVD)的 Ti/Al 双层结构。沉积 100nm 厚度的 Ti 既可以作为粘附层,也可以作为阻挡层,防止高温工作时 Al-Si 溶解引起的器件失效,同时能够与重掺杂的硅欧姆接触区形成良好的欧姆接触^[12]。浮雕式电阻会使芯片表面存在超过 1.65 μm 高度的台阶,针对芯片的电阻结构,在浮雕式电阻结构两端的欧姆接触区周围增加 5 μm 宽的金属覆盖区域,制造更宽的金属侧墙和用增加金属引线厚度至 1.5 μm 的方法来减缓台阶陡度,使电阻结构侧墙垂直度从近 90° 改变为 50° 左右的坡度,起到了局部平滑的作用,能够有效提高金属引线的可靠性。为了配合上述金属引线几何形状和厚度的变化,金属引线的图形化采用了 ICP 高密度等离子干法刻蚀技术,从而能够有效抑制通常湿法腐蚀时线宽损失较大,台阶处钻蚀严重的问题,进一步增强金属引线的可靠性。图 3 所示为加速度传感器悬臂梁上的两个压敏电阻和金属引线的照片,从图中可以看出,金属引线对电阻两端欧姆接触区覆盖的形式。图 4 则为压敏电阻的局部 SEM 照片,从图 4 可以清晰地看出,电阻一端欧姆接触区的金属引线覆盖的台阶平滑坡度形状。

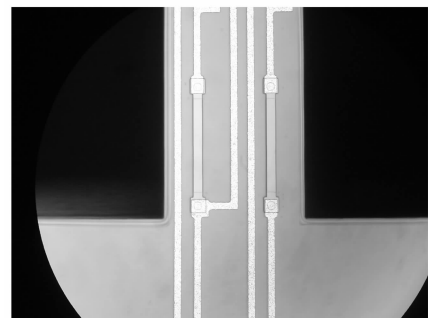


图 3 加速度传感器的两个压敏电阻和金属引线
Fig. 3 Two piezoresistors and metal wire on the accelerometer

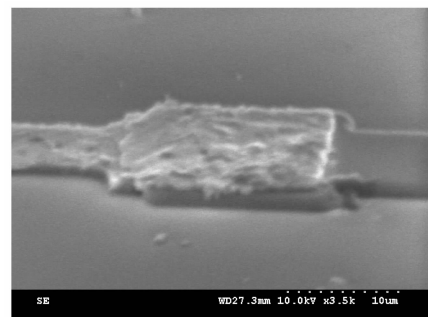


图 4 欧姆接触区的金属引线覆盖 SEM 照片
Fig. 4 SEM photograph of the contact area between the metal wire and the piezoresistor

3.2 质量块吸附问题的改进

在 PYREX 玻璃和芯片的阳极键合过程中, PYREX 玻璃和加速度传感器质量块之间电位差产生的静电吸引力使质量块容易吸附在玻璃表面, 导致加速度传感器的失效. 针对键合过程中质量块的吸附问题, 通过在 PYREX 玻璃上制作防吸附金属电极来防止质量块吸附现象的发生. 相对于利用质量块与玻璃之间的二氧化硅或氮化硅隔离层^[13], 利用双电场键合^[14]、调节键合过程的温度^[15]等避免吸附的方法, 这些方法具有更简化的工艺流程和更强的适应性. 金属电极的形状如图 5 所示, 由插入硅/玻璃键合面边缘的梳状电极和质量块下方的正方形电极连接组成. 梳状电极的梳齿宽度为 $30\mu\text{m}$, 插入键合区深度约 $10\mu\text{m}$, 正方形电极的尺寸为 $1500\mu\text{m} \times 1500\mu\text{m}$. 金属电极由总共 250nm 厚的 Cr/Au 两层材料组成, 通过 PVD 沉积工艺和剥离工艺在 PYREX 玻璃上制作完成. 在键合过程中, 通过插入键合面的梳状电极与硅基的接触来保持硅质量块与正方形电极之间的电位相等, 从而避免了静电力产生的质量块吸附问题. 图 6 为集成传感器背面的照片, 透过 PYREX 玻璃可以看到梳状电极和键合区域的情况. 梳状电极的前端插入键合面边缘, 但 250nm 厚的梳状电极则对键合基本没有影响, 照片

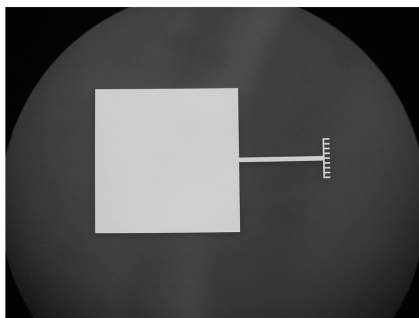


图 5 PYREX 玻璃上的金属电极

Fig. 5 Metal electrode on the PYREX glass

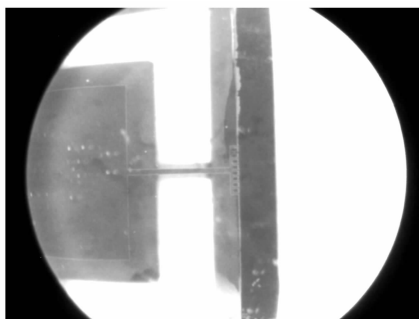


图 6 集成传感器背面的梳状电极照片

Fig. 6 Photograph of the electrode from the backside of multi-sensor

显示电极附近的硅/玻璃同样形成了完整的键合面.

3.3 工艺流程

由于集成传感器需要集成三种不同的传感器, 因此在集成工艺流程中必须根据三种传感器的结构尽量安排兼容的工艺步骤, 以减少工艺的复杂性和成本. 针对集成传感器芯片中各传感器的结构, 制定了相应的工艺流程. 兼容的工艺流程包括: 在硅片正面可以利用相同的离子注入工艺和刻蚀工艺制作出三种传感器的浮雕式敏感电阻; 在硅片背面可以利用两次 KOH 湿法腐蚀同时制作出加速度传感器的质量块和支撑膜、压力传感器的压力膜; 硅片与 PYREX 玻璃的阳极键合则同时制作出压力传感器的真空腔和加速度传感器的支撑基底. 集成传感器采用 SOI 硅片, 整个工艺流程共用 8 块掩模版, 包括硅加工工艺、玻璃工艺和阳极键合, 工艺流程见图 7 所示. SOI 硅片的规格为: n 型双面抛光 SOI 硅片 100mm , (100) 晶面, 电阻率为 $10\Omega \cdot \text{cm}$, 厚度为 $400\mu\text{m}$, 硅片器件层厚度为 $1.65\mu\text{m}$.

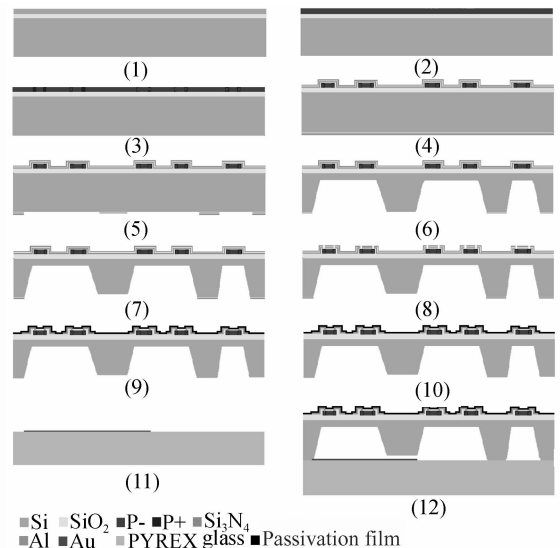


图 7 集成传感器的工艺流程图

Fig. 7 Fabrication processes of the monolithic multi-sensor

主要的工艺流程如下: (1) 清洗硅片. (2) 首先进行热氧化工艺以提高离子注入的均匀性, 然后整个 SOI 硅片的器件层被硼离子注入, 获得 p 型掺杂. 注入能量为 80keV , 注入剂量为 $1.5 \times 10^{15} \text{cm}^{-2}$, 最后在 1100°C 的氮气环境下退火 1h , 以保持杂质浓度在 SOI 器件层中均匀分布. (3) 正面光刻欧姆接触区域, 刻蚀 SiO₂, 再一次进行硼离子注入, 注入剂量为 $3 \times 10^{16} \text{cm}^{-2}$ 以形成低阻的欧姆接触区. (4) 刻蚀其余区域的 Si, 以形成集成传感器的浮雕式电阻和电阻两边欧姆接触区的图形. 使用低压化学气相沉积

(LPCVD)和热氧化工艺形成两层 Si_3N_4 和 SiO_2 薄膜作为两次 KOH 腐蚀的掩膜层,同时利用 Si_3N_4 和 SiO_2 的复合双层结构减小薄膜应力的影响。(5)背面光刻,刻蚀背面第一层 SiO_2 和 Si_3N_4 ,形成第一次 KOH 腐蚀的掩膜层;然后再次背面光刻,刻蚀背面第二层 SiO_2 和 Si_3N_4 形成第二次 KOH 腐蚀的掩膜层.背面腐蚀提供活动质量块的凸角补偿保证质量块的形状对称。(6)背面第一次 KOH 各向异性腐蚀,形成硅膜支撑的活动质量块和压力传感器的压力腔结构,背面腐蚀的深度为 $365\mu\text{m}$ 。(7)背面第二次 KOH 各向异性腐蚀,形成质量块与键合玻璃之间的空隙为 $5\mu\text{m}$ 。(8)正面光刻,刻蚀形成铝引线电阻之间的引线孔。(9)在硅片正面物理气相沉积 Ti/Al 层,正面光刻,ICP 刻蚀金属形成金属引线,然后在 500°C 条件下进行合金化。(10)ICP 深刻蚀加速度传感器硅膜以形成悬臂梁结构。(11)在 PY-REX 玻璃上通过 PVD 沉积 Cr/Au 层,然后通过剥离工艺形成电极,用来防止加速度传感器的质量块在阳极键合时被静电力吸附到玻璃上,其中金属 Cr 层将增加金属电极在玻璃表面的附着力。(12)硅/玻璃阳极键合,划片,封装测试产品,完成整个工艺过程.本集成传感器在北京大学微电子中心加工完成.图 8 为集成传感器的照片.



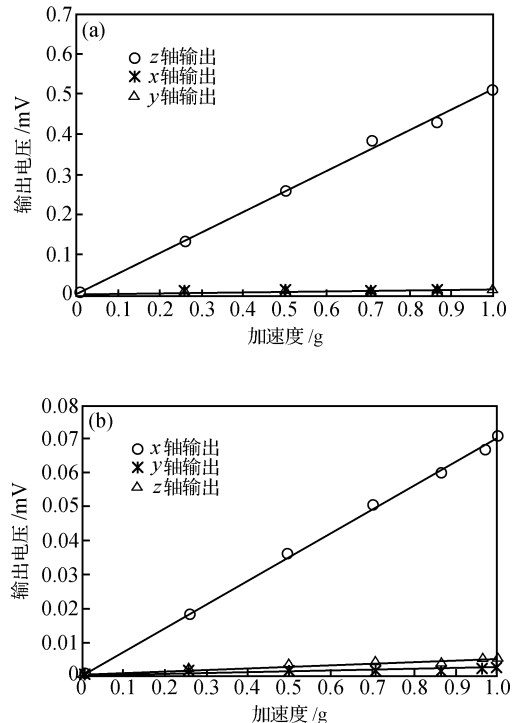
图 8 集成传感器的照片

Fig. 8 Photograph of fabricated multi-sensor

4 测试结果

对加工完成的集成传感器芯片性能进行了测试.三轴加速度传感器利用精密翻转台进行测试.用 5V 恒压源对加速度传感器的惠斯登电桥供电,测量温度为 20°C .三轴加速度传感器在 $0\sim 1\text{g}$ 的 z 轴和 x 轴加速度分别作用下的输出电压如图 9 所示.其中 z 轴传感器的输出灵敏度为 0.508mV/g ,输出非线性小于 2% FS; x 轴传感器的输出灵敏度为

0.071mV/g ,输出非线性小于 1% FS.三轴传感器之间的最大偏轴灵敏度小于 5% .三轴加速度传感器中 x 轴和 y 轴具有相同的结构和检测形式, y 轴的输出情况与 x 轴基本相同.

图 9 三轴加速度传感器的输出 (a) z 轴加速度输入时,三轴加速度传感器的输出;(b) x 轴加速度输入时,三轴加速度传感器的输出Fig. 9 Accelerometer output characteristics as a function of acceleration (a) z -axis acceleration;(b) x -axis acceleration

压力传感器在浮球式压力计试验台上进行测试,使用 5V 恒压源供电,测量温度为 20°C 和 70°C .测量结果如图 10 所示,测量范围为 $0\sim 200\text{kPa}$.测量结果显示:在 20°C 的室温下,压力传感器输出灵敏度为 0.10087mV/kPa ,非线性为 0.04% FS;在 70°C 的温度下,输出灵敏度为 0.0987mV/kPa ,非线性为 0.01% FS.从图 10 的结果可以知道,在 $20\sim 70^\circ\text{C}$ 的温度范围内,未进行温度漂移补偿的压力传感器电桥的热零点漂移 (TCO) 和热灵敏度漂移 (TCS) 分别为 $-5.16 \times 10^{-5}/^\circ\text{C}$ 和 $-4.27 \times 10^{-4}/^\circ\text{C}$.图 11 为在 $25\sim 140^\circ\text{C}$ 的温度范围内,压力传感器的热零点漂移随温度变化的曲线.由图 11 可知,在 $25\sim 140^\circ\text{C}$ 的温度范围内,压力传感器电桥的 TCO 从 $-3.45 \times 10^{-5}/^\circ\text{C}$ 变化到 $-1.70 \times 10^{-4}/^\circ\text{C}$.与在 70°C 的情况相比,压力传感器在 140°C 时的 TCO 虽有一定增加,但图 10 和图 11 的结果仍然表明,集成传感器芯片上压力传感器具有良好的温度适应特性.在集成传感器中,压力传感器的压阻与加

速度传感器的压阻具有相同的掺杂浓度,因此说明加速度传感器同样有较好的温度适应特性.

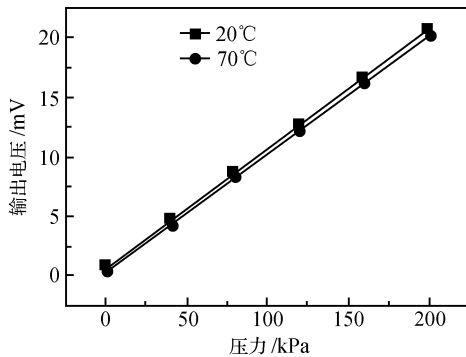


图 10 压力传感器的输出曲线

Fig. 10 Output of the absolute pressure sensor

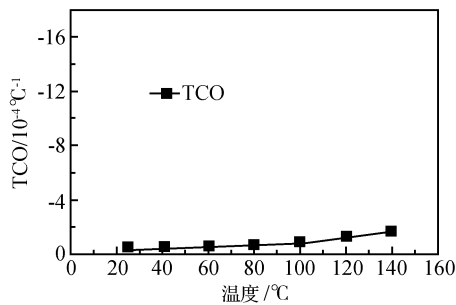


图 11 压力传感器的 TCO 随温度的变化曲线

Fig. 11 TCO shift of the absolute pressure sensor as a function of temperature

温度传感器利用恒温测试箱测试,测量结果及拟合曲线如图 12 所示,测量范围 $-30\sim 150^{\circ}\text{C}$. 温度传感器的灵敏度为 $5.617 \times 10^{-3} \text{ k}\Omega/^{\circ}\text{C}$,非线性为 0.48% FS,而且在 120°C 以上时仍表现出了良好的温度线性.

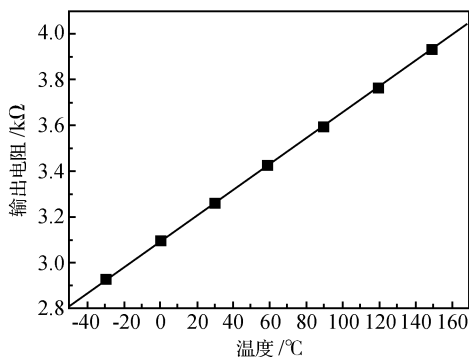


图 12 温度传感器的输出曲线

Fig. 12 Output of the temperature sensor

5 结论

利用 SOI 材料,采用 MEMS 技术,研制了一种硅微集成传感器,其中包括基于压阻效应的三轴加速度、绝对压力传感器和基于掺杂硅电阻温度效应的温度传感器.通过工艺改进解决了常规工艺过程中金属引线可靠性问题和质量块吸附问题,使这种集成传感器具有较宽的温度适应性、高成品率、高可靠性的特点,成品器件的体积为 $4\text{mm} \times 6\text{mm} \times 0.9\text{mm}$.性能测试结果表明:这种三轴加速度、绝对压力、温度集成的传感器具有良好的性能,能够应用于航天航空、军事、汽车等需要同时进行多参数检测的领域.

参考文献

- [1] DeHennis A D, Wise K D. A wireless microsystem for the remote sensing of pressure, temperature and relative humidity. *J Microelectromech Syst.* 2005, 14: 12
- [2] Fujita T, Maenaka K. Integrated multi-environmental sensing-system for the intelligent data carrier. *Sensors and Actuators A*, 2002, 97/98: 527
- [3] Norlin P, Ohman O, Ekstrom B, et al. A chemical micro analysis system for the measurement of pressure, flow rate, temperature, conductivity, UV-absorption and fluorescence. *Sensors and Actuators A*, 1998, 49: 34
- [4] Hyldgard A, Hansen O, Thomsen E V. Fish and chips: single chip silicon MEMS CTDL salinity, temperature, pressure and light sensor for use in fisheries research. *IEEE MEMS*, 2005: 303
- [5] Wu Yu, Zhao Zhan, Fang Zhen, et al. Integrated sensor of temperature humidity and pressure based on polyimide. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2004, 25(4): 101 (in Chinese) [武宇, 赵湛, 方震, 等. 基于聚酰亚胺的温湿压集成传感器. *仪器仪表学报*, 2004, 25(4): 101]
- [6] Zhang Zhaoyong, Qin Ming, Zhang Zhongping, et al. Fabrication of a CMOS two-dimensional integrated wind speed and wind direction sensor. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2003, 24(4): 340 (in Chinese) [张昭勇, 秦明, 张中平, 等. CMOS 集成二维风速和风向传感器的研制. *仪器仪表学报*, 2003, 24(4): 340]
- [7] Diem B, Rey P. SOI 'SIMOX' from bulk to surface micromachining; a new age for silicon sensors and actuators. *Sensors and Actuators A*, 1995, 46/47: 8
- [8] Zhao Yulong, Zhao Libo, Jiang Zhuangde. A novel high temperature sensor on the basis of SOI layers. *Sensors and Actuators A*, 2003, 108: 108
- [9] Kyung I L, Takao H, Sawada K, et al. Low temperature dependence three-axis accelerometer for high temperature environments with temperature control of SOI piezoresistors. *Sensors and Actuators A*, 2003, 104: 53
- [10] Kanda Y. A graphical representation of the piezoresistance coefficients in silicon. *IEEE Trans Electron Devices*, 1982, 29(1): 64
- [11] Arora N D, Hauser J R, Roulston D J. Electron and hole

- mobilities in silicon as a function of concentration and temperature. *IEEE Trans Electron Devices*, 1982, 29(2):292
- [12] Sze S M. *VLSI technology*. New York: McGraw-Hill, 1983
- [13] Huang Qingan, Tong Qinyi. Role of SiO₂ film in Si / glass bonding technology. *Chinese Journal of Semiconductors*, 1995, 16(5):391 (in Chinese)[黄庆安, 童勤义. SiO₂ 钝化膜对硅/玻璃静电键合的影响. *半导体学报*, 1995, 16(5):391]
- [14] Yang Daohong, Xu Chen, Shen Guangdi. Applying double electric fields to avoid deteriorating movable sensitive parts in MEMS during anodic bonding. *Chinese Journal of Semiconductors*, 2004, 25(10):1249
- [15] Puers B, Lapadatu D. Extremely miniaturized capacitive movement sensors using new suspension systems. *Sensors and Actuators A*, 1994, 41:129

Fabrication of Monolithic Silicon Multi-Sensor on SOI Wafer*

Xu Jingbo^{1,†}, Zhao Yulong¹, Jiang Zhuangde¹, Zhang Dacheng², Yang Fang², and Sun Jian¹

(1 *State Key Laboratory of Mechanical Manufacturing Systems, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China*)

(2 *Institute of Microelectronics, Peking University, Beijing 100871, China*)

Abstract: A monolithic silicon multi-sensor on SOI wafer that consists of a three-axis piezoresistive accelerometer, a piezoresistive absolute pressure sensor, and a silicon thermistor temperature sensor is presented. The fabrication process of the sensor is described. An effective micromachining process is developed to improve the reliability of the metal wire in the multi-sensor and to avoid adhesion between the PYREX glass and silicon mass in the process of anodic bonding. Finally, the measurement results of the sensor are shown.

Key words: monolithic multi-sensor; SOI; MEMS

PACC: 0630N; 6855; 8110

Article ID: 0253-4177(2007)02-0302-06

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Nos. 50535030, 50475085), the State Key Development Program for Basic Research of China (No. 2004CB619302), and the Program for New Century Excellent Talents in the University of the Ministry of Education of China (No. NCET-05-0842)

† Corresponding author. Email: xjb0510@163.com

Received 18 July 2006, revised manuscript received 7 October 2006

©2007 Chinese Institute of Electronics