

MEMS SOI 高温压力传感器芯片

郭玉刚¹, 饶浩¹, 陶茂军¹, 田雷², 吴佐飞²

(1. 中国航空发动机集团控制系统研究所, 江苏 无锡 214063;

2. 中国电子科技集团公司第四十九研究所, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: 研制了一种基于微机电系统(MEMS)技术的压阻式绝缘体上硅(SOI)高温压力传感器芯片。压力敏感电阻器与衬底之间采用二氧化硅介质隔离,解决了传统的PN结隔离方式在高温条件下的漏电失效问题。研制的高温压力芯片压力量程为0~2 MPa,室温1 mA条件下满量程输出信号达到100 mV以上,非线性小于0.15 %FS,压力迟滞小于0.05 %FS。在-55~+150℃温度范围内,零点温度系数小于20 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$,灵敏度温度系数小于0.02 %FS/ $^\circ\text{C}$,零点温度迟滞小于0.1 %FS。将芯片样本在150℃环境下进行了短期零点漂移测试验证其稳定性,结果优于0.05 %FS。

关键词: 压力传感器; 绝缘体上硅; 微机电系统; 稳定性

中图分类号: TP 212 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-9787(2018)11-0092-04

MEMS SOI high temperature pressure sensor chip

GUO Yu-gang¹, RAO Hao¹, TAO Mao-jun¹, TIAN Lei², WU Zuo-fei²

(1. Control System Institute of Aero Engine Corporation of China, Wuxi 214063, China;

2. The 49th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Harbin 150001, China)

Abstract: A silicon on insulator(SOI) high temperature piezoresistive pressure sensor chip is researched and fabricated based on micro-electro-mechanical system(MEMS) technology. The pressure sensitive resistors are isolated by SiO_2 from the silicon substrate to solve current leakage problem of the traditional PN junction isolated type in high temperature. The pressure range of the developed high temperature pressure sensor chip is 0~2 MPa, the full scale output is more than 100 mV with 1 mA at room temperature, the non-linearity is less than 0.15 %FS, the pressure hysteresis is less than 0.05 %FS. In the operating temperature range from -55℃ to 150℃, the temperature coefficient of zero-point is less than 20 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$, the temperature coefficient of sensitivity is less than 0.02 %FS/ $^\circ\text{C}$, the zero-point temperature hysteresis is less than 0.1 %FS. The short time zero-point drift test is carried out to verify its stability, the result is prior to 0.05 %FS in 150℃ condition.

Keywords: pressure sensor; silicon on insulator(SOI); micro-electro-mechanical system(MEMS); stability

0 引言

在一些特殊应用领域如航空航天、国防建设、能源开发等,需要传感器工作在120℃以上的环境中,使得高温压力传感器的需求与日俱增,其中,绝缘体上硅(silicon on insulator, SOI)单晶硅高温压力传感器凭借其特有的优势受到了市场的青睐^[1~3]。如以美国Kulite公司的XTEH-10L-190(M)系列产品为代表的超高温压力传感器,通过无引线封装结构设计,使其最高工作温度达到600℃以上^[4,5]。国内的研究机构也进行相关产品的研究,中国电子科技集团公司第四十九研究所的SOI压力传感器已经产品化^[6],采用无引线技术的SOI压力传感器样机最高工作温度已经达到了450℃^[7]。西安交通大学、天津大学、中北大学等高校

也进行相关的研究,目前仍处于原理样机阶段,长期稳定性等重要参数较Kulite产品仍有较大差距^[8]。为深入了解SOI压力传感器在发动机高温工作条件下的可靠性、长期稳定性等关键特性,本文研制了一种0~2 MPa压力量程的SOI高温压力传感器芯片,为后续SOI压力传感器长期在-55~150℃工作温度下的性能研究打下基础。

1 芯片设计

1.1 工作原理

压阻式压力传感器通常采用惠斯通电桥的全桥电路形式,4个桥臂电阻器应尽可能满足:1)等平均应力(绝对值)并最大限度利用应力;2)等压阻系数;3)等电阻值;4)等温度系数和等灵敏度系数^[9,10]。其等效电路如图1。

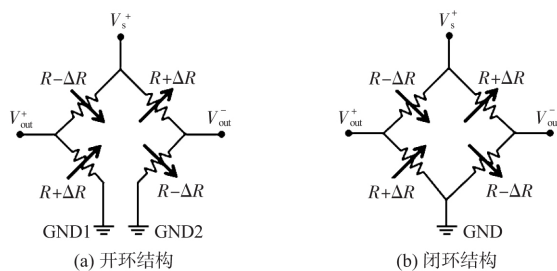


图 1 惠斯通电桥电路

电桥输出公式为

$$V_{out} = \left(\Delta \frac{R}{R} \right) \cdot V_s^+ \quad (1)$$

式中 V_{out} 为电桥输出电压信号值, μV ; R 为电桥电阻值, Ω ; ΔR 为被测压力引起的电桥电阻值变化量, Ω ; V_s^+ 为电桥激励电压, mV 。

单晶硅晶轴坐标系中,敏感电阻值相对变化量 $\Delta \frac{R}{R}$ 与应力 σ 之间的关系为

$$\Delta \frac{R}{R} = \pi_1 \sigma_1 + \pi_t \sigma_t \quad (2)$$

式中 π_1 , π_t 分别为纵向和横向压阻系数, Pa^{-1} ; σ_1 , σ_t 分别为敏感电阻器受到的纵向和横向应力, Pa 。由于单晶硅为金刚石立方晶体结构,在不同晶面上的原子排列的密度不同,使其具有各向异性的特点,在不同的晶向上压阻系数各不相同。为使敏感电阻能够尽量满足惠斯通电桥的应用要求,且便于微机电系统 (micro-electro-mechanical system, MEMS) 微机械加工进行大批量生产,目前常用的一种方案为选用 (100) 晶面的单晶硅衬底,通过湿法或干法腐蚀工艺加工出方形敏感膜,而敏感电阻器则分别沿 $[011]$ 和 $[0\bar{1}1]$ 晶向^[10],在此条件下 π_1 , π_t 分别为

$$\pi_1 = \frac{1}{2} (\pi_{11} + \pi_{12} + \pi_{44}) \approx \frac{1}{2} \pi_{44} \quad (3)$$

$$\pi_t = \frac{1}{2} (\pi_{11} + \pi_{12} - \pi_{44}) \approx -\frac{1}{2} \pi_{44} \quad (4)$$

式中 π_{11} , π_{12} , π_{44} 分别为单晶硅主轴系的纵向、横向及剪切压阻系数 Pa 。最终 $V_{out} \approx \frac{1}{2} \pi_{44} (\sigma_1 - \sigma_t) V_s^+$ 。

当被测压强作用在敏感膜表面时,在敏感电阻器上产生与被测压强呈近似线性关系的应力,引起敏感电阻值的变化,在一定电源激励下从惠斯通电桥输出端可以获得反应被测压强大小的电压信号。

1.2 芯片结构设计

本文采用上述常规设计方案,选用了厚度为 $525 \mu\text{m}$ 的 (100) 晶向单晶硅衬底 SOI 材料片,芯片设计量程为绝压 $0 \sim 2 \text{ MPa}$,方形敏感膜尺寸为 $1000 \mu\text{m} \times 1000 \mu\text{m}$,芯片整体尺寸为 $2.5 \text{ mm} \times 2.5 \text{ mm}$ 。对不同敏感膜厚度条件下的芯片

结构进行有限元仿真,确定最终满足应用要求的敏感膜厚度为 $65 \mu\text{m}$ 。根据芯片结构尺寸建立有限元模型,定义单晶硅各向异性材料参数^[11],选用高阶三维 20 节点实体结构单元 Solid186 以及映射网格划分方式,并进行网格无关性验证,建模及网格划分结果如图 2 所示。

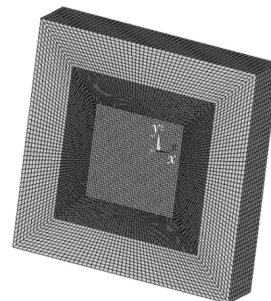
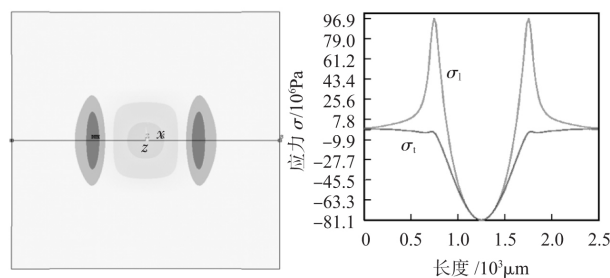


图 2 SOI 高温压力传感器芯片有限元模型

在敏感膜上施加 2 MPa 压力载荷后可以得到敏感膜上应力分布的云图,从而确定敏感电阻的位置以及其所承受的平均应力,仿真结果图 3 所示。



(a) 芯片表面 x 方向应力云图

(b) 芯片表面 x 方向应力曲线

图 3 仿真结果

从仿真结果中可以看出,在方形敏感膜的边沿中心处具有最大应力值,敏感电阻器处于该位置可以获得最高输出灵敏度以及最小非线性。

1.3 芯片版图设计

根据芯片关键结构尺寸定义以及有限元仿真结果,将敏感电阻器分布在敏感膜边缘中心应力集中区域,并充分利用敏感膜边缘外侧的应力集中区以提高芯片灵敏度,最终形成芯片整体版图如图 4 所示。

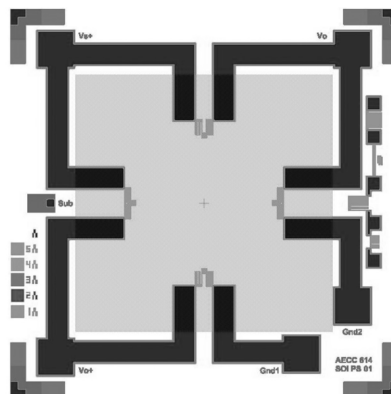


图 4 SOI 高温压力传感器芯片版图

版图分为 4 个层次,分别为敏感电阻层、引线孔层、金

属层以及硅杯窗口层,其中关键层次为敏感电阻层。为充分利用应力集中区,敏感电阻器采用蛇形排列结构,电阻条宽设计值为 $5\text{ }\mu\text{m}$,敏感电阻器设计方案如图 5 所示。

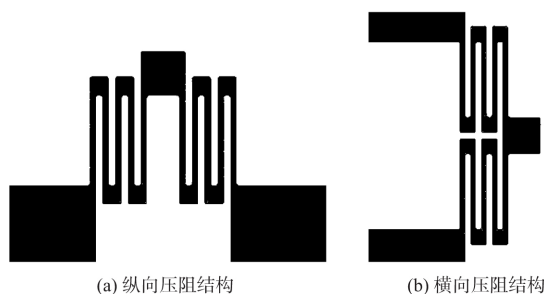


图 5 敏感电阻器结构

2 芯片制备

本文设计的 SOI 高温压力传感器芯片由中国电子科技集团公司第四十九研究所协助加工,采用其自主开发的工艺条件^[6],具体工艺实现步骤如下所述:

1) 将 SOI 材料片清洗后进行薄层氧化,厚度 50 nm ,作为离子注入的缓冲层;

2) 对 SOI 材料片器件层(正面)进行浓硼离子注入,注入能量 80 keV ,采用高掺杂注入条件,使表面浓度达到 $2\times 10^{20}\text{ cm}^{-3}$,可以保证器件在更高的温度下工作,且使芯片在恒流源供电模式下工作时可以进行温度自补偿;

3) 将器件层进行第一次光刻后,采用反应离子刻蚀(reactive ion etching, RIE)干法刻蚀工艺对器件层进行刻蚀加工,形成压力敏感电阻器图形;

4) 将圆片进行第二次氧化,在敏感电阻表面形成厚度 $200\sim 250\text{ nm}$ 二氧化硅绝缘层的同时,利用氧化工艺 $1050\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的高温条件对注入的浓硼杂质进行退火;

5) 采用低压化学气相沉积(low pressure chemical vapor deposition, LPCVD)工艺在圆片的正反表面淀积形成厚度为 $100\sim 150\text{ nm}$ 的氮化硅薄膜,器件层(正面)上的氮化硅用于补偿二氧化硅的压应力,背面的氮化硅则用于湿法腐蚀的掩蔽层;

6) 对圆片进行第二次光刻,将敏感电阻器上特定区域的氮化硅以及二氧化硅刻蚀去除,形成金属引线孔;

7) 在圆片正面蒸发厚度 $1.2\text{ }\mu\text{m}$ 的金属铝,金属通过绝缘介质层(氮化硅、二氧化硅)上的引线孔与敏感电阻器连接,再进行第三次光刻(金属层光刻)及刻蚀后形成金属电极及互联引线,最后在真空条件下进行合金,使金属铝与敏感电阻器之间形成良好的欧姆接触,合金温度为 $480\text{ }^{\circ}\text{C}$,时间为 30 min ;

8) 使用双面光刻机对圆片背面的氮化硅进行光刻,并用湿法腐蚀工艺去除特定区域的氮化硅和氧化硅,暴露出待腐蚀的单晶硅区域;

9) 将圆片的正面进行保护,背面采用氮化硅及二氧化

硅介质层进行掩蔽,置于温度恒定在 $78\sim 82\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间、浓度 35% 的氢氧化钾溶液中对暴露的单晶硅区域进行腐蚀,通过控制腐蚀的时间,得到期望的硅杯结构以及 $65\text{ }\mu\text{m}$ 厚的敏感膜;

10) 腐蚀完成后,去除圆片背面的氮化硅及二氧化硅,将圆片与 $500\text{ }\mu\text{m}$ 厚的 Pyrex7740 玻璃进行阳极键合;

11) 将阳极键合后的圆片进行切割、分片,最终进行封装与测试,完成芯片研制。

最终得到的 SOI 高温压力传感器芯片如图 6 所示。

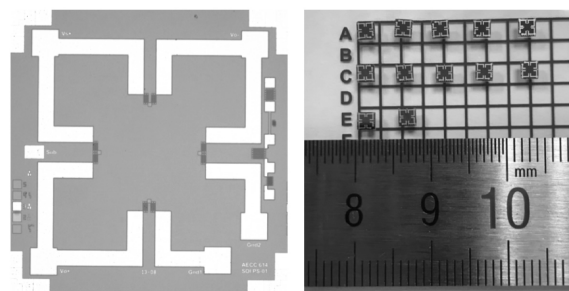


图 6 SOI 高温压力传感器芯片照片

3 封装及测试

选用可伐合金材质的充油芯体外壳进行 SOI 高温压力传感器芯片的封装,为尽量减小由封装引入的应力,粘片胶水采用邵氏硬度小于 50 的硅胶并严格控制点胶量,芯片与外壳之间采用线径 1.2 mil ($1\text{ mil}=0.0254\text{ mm}$) 的金线互联。同样为排除封装的影响,未进行波纹膜片的焊接以及硅油充注的工艺,封装后的样件如图 7 所示。

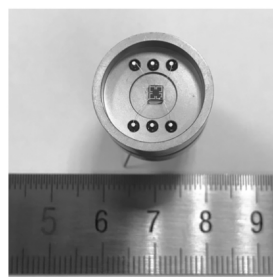


图 7 SOI 高温压力传感器样件

SOI 高温压力传感器芯片封装后的样件通过工装夹具与压力控制器连接,传感器连同工装夹具一同置于高低温烘箱内,当烘箱内设定的温度稳定后即可对样件施加特定的压力值,记录传感器输出端的电压信号值。采用 1 mA 恒流源供电测试:

1) 在恒温 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 条件下,对样件及测试系统进行预压和气密性检查后,进行 3 次 $0\sim 2\text{ MPa}$ 正反行程压力循环标定测试,确定样件的基本性能参数,包括零点输出、满量程输出、非线性、迟滞、重复性以及输入输出阻抗;

2) 按照 $25\text{ }^{\circ}\text{C}\rightarrow -55\text{ }^{\circ}\text{C}\rightarrow 25\text{ }^{\circ}\text{C}\rightarrow 150\text{ }^{\circ}\text{C}\rightarrow 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的顺序依次进行测试,每个测试点温度恒定后保温 2 h ,确保样件受热均匀后在进行数据采集;

3) 在恒温 150℃条件下,采集 SOI 高温压力传感器 30 kPa 压力条件下的信号输出,每间隔 1 h 进行 1 次数据采集,共进行了 6 h 测试,期间传感器保持上电工作状态,测试其在高温条件下的短时稳定性。

SOI 高温压力传感器测试数据如表 1、表 2 所示。

表 1 SOI 高温压力传感器温度特性测试数据

温度/℃	30 kPa	400 kPa	800 kPa	1 200 kPa	1 600 kPa	2 000 kPa
25	-0.986 mV	18.072 mV	38.711 mV	59.424 mV	80.213 mV	101.078 mV
-55	-1.590 mV	17.541 mV	38.428 mV	59.437 mV	80.579 mV	101.849 mV
25	-0.974 mV	18.075 mV	38.714 mV	59.426 mV	80.216 mV	101.045 mV
150	-0.980 mV	18.094 mV	38.765 mV	59.474 mV	80.220 mV	101.005 mV
25	-0.977 mV	18.030 mV	38.687 mV	59.421 mV	80.230 mV	101.116 mV

表 2 150℃下短时稳定性测试数据

时间/h	1	2	3	4	5	6
输出/mV	-0.994	-1.016	-1.021	-1.024	-1.019	-1.002

SOI 高温压力传感器测试结果为:在 1 mA 恒流激励下,传感器在 25℃时零点输出为-2.54 mV,2 MPa 压力载荷下的满量程输出为 103.62 mV,压力迟滞及重复性均小于 0.05 %FS,非线性小于 0.15 %FS,输入输出阻抗均为 4.4 kΩ;在-55~150℃温度范围内,零点温漂小于 20 μV/℃,灵敏度温漂由于恒流源下温度自补偿的作用而小于 0.02 %FS/℃,零点温度迟滞小于 0.1 %FS;150℃温度下 6 h 内零点漂移小于 0.05 mV。

4 结 论

本文研制的 SOI 高温压力传感器芯片具有较好的常温静态特性,在高温条件下也具有良好的工作特性及稳定性;实际测试数据与设计值吻合,验证了设计方案的合理性。后续将针对本文设计的 SOI 高温压力传感器进行可靠性分

析以及 150℃条件下的长期稳定性测试。

参考文献:

[1] 曹 乐,樊尚春,刑维巍.MEMS 压力传感器原理及其应用[J].计测技术,2012,32(S1):108-110.

[2] 姜 波,齐杏林,赵志宁,等.MEMS 压力传感器现状及其在弹药上的应用[J].传感器与微系统,2013,32(2):4-7.

[3] 耿振亚,宋国庆,张冬梅.基于 MEMS 实现 SOI 压力传感器的工艺研究[J].传感器世界,2010(1):28-31.

[4] Kurtz A D, Ned A A, Epstein A H.Ultra high temperature miniature, SOI sensors for extreme environments [C]//Proceedings of IMAPS International HiTEC Conference, New Mexico, USA, 2004: 1-11.

[5] Kurtz A D, Ned A A, Epstein A H.Improved ruggedized SOI transducers operational above 600℃[C]//Proceedings of Kulite Semiconductor Products Inc, The 21st Transducer Workshop, 2004: 22-23.

[6] 田 雷,金建东,齐 虹,等.高掺杂点电极 SOI 压阻式压力传感器及制造方法:中国,200810137113.0[P].2009-01-21.

[7] 田 雷,尹延昭,苗 欣,等.无引线封装高温压力传感器[J].半导体技术,2014,39(12):921-925.

[8] 何文涛,李艳华,邹江波,等.高温压力传感器的研究现状与发展趋势[J].遥测遥控,2016,37(6):61-71.

[9] Smith C S.Piezoresistance effect in germanium and silicon [J].Physical Review,1954,94(1):42-49.

[10] 孙以材,刘玉岭,孟庆浩.压力传感器的设计、制造与应用[M].北京:冶金工业出版社,2000:114-123.

[11] Hopcroft M A, Nix W D, Kenny T W.What is the Young's modulus of silicon [J].Micro-Electro-Mechanical System, 2010, 19(2):229-238.

作者简介:

郭玉刚(1983-)男,硕士研究生,工程师,主要从事 MEMS 压力传感器研发工作,E-mail:gyg43245@163.com。

(上接第 91 页)

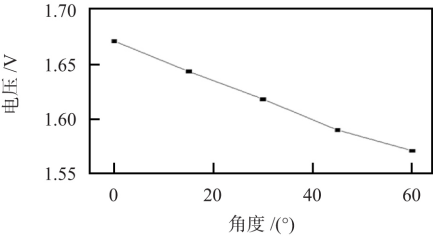


图 7 输出电压随倾角变化曲线

5 结 论

经实验证明:本文设计的倾角测量仪测量范围广、稳定性高、线性度良好。

参考文献:

[1] 张延豫,时振彬,李士光,等.新型倾角传感器设计[J].科技创新导报,2013(22):63-64.

[2] 王宏伟.铍青铜倾角传感器及其线性度补偿[J].传感器与微

系统,2015,34(8):32-34,38.

[3] 刘民杰,刘云峰,董景新,等.基于 MS3110 电容读取芯片的 MEMS 加速度计 [J].中国惯性技术学报,2010,18(2):236-239.

[4] 耿赛柳,徐大诚,郭述文.一种电容式微加速计偏置电压和标度因数自动标定方法[J].传感器与微系统,2013,32(7):62-67.

[5] 李慧敏,樊记明,杨 笑.基于 STM32 和 OV7670 的图像采集与显示系统设计 [J].传感器与微系统,2016,35(9):114-117.

[6] 林小波,崔永俊,甌国涌,等.基于加速度计的数字显示倾角测量仪[J].传感器与微系统,2008,27(1):64-65.

作者简介:

张 浩(1992-)男,硕士,主要研究方向为传感器系统。