

倒杯式耐高温高频响压阻式压力传感器

赵立波^{1,2}, 赵玉龙¹, 李建波¹, 梁建强¹, 李勇², 蒋庄德¹

(1. 西安交通大学机械制造系统工程国家重点实验室, 710049, 西安;

2. 清华大学摩擦学国家重点实验室, 100084, 北京)

摘要: 采用微型机械电子系统(MEMS)技术制作出了高精度、高灵敏度的硅隔离(SOI)倒杯式耐高温压阻力敏芯片,利用静电键合工艺将力敏芯片封装到玻璃环上,再通过玻璃浆料烧结工艺或高温胶黏剂将玻璃环装配到齐平式机械结构上,从而避免了管腔效应的影响,实现了耐高温高频响压阻式压力传感器的基本制作.通过有限元仿真和实验,分析了安装预紧力对传感器性能的影响,由传感器静态和动态实验得到传感器的精确度为 $\pm 0.114\%$ FS,动态响应频率为 694.4 kHz,均满足火工品爆破测试等高温高频动态压力测试的要求.

关键词: 微型机械电子系统;硅隔离倒杯式压阻力敏芯片;齐平式;预紧力

中图分类号: TP212 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2010)07-0050-05

Inverted-Cup High-Temperature and High-Frequency Piezoresistive Pressure Sensor

ZHAO Libo^{1,2}, ZHAO Yulong¹, LI Jianbo¹, LIANG Jianqiang¹, LI Yong², JIANG Zhuangde¹

(1. State Key Laboratory for Manufacturing Systems Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. State Key Laboratory of Tribology, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Silicon-on-insulator (SOI) inverted-cup high-temperature piezoresistive pressure sensitive chip with high accuracy and sensitivity was developed by micro electro-mechanical system (MEMS) technology. It was bonded on glass ring with electrostatic bonding technology and the glass ring was packaged on the flush-type mechanical structure with glass slurry sintering process or high temperature adhesive technology. The channelling effect was avoided due to the flush-type mechanical structure and the packaging technique, so the inverted-cup high-temperature and high-frequency piezoresistive pressure sensor was fabricated basically. The effect of installation pre-tightening force on the sensor properties was analyzed with finite element method (FEM) and the experiments. The static and dynamic experiment results show that the accuracy of the sensor gets $\pm 0.114\%$ FS and the dynamic response frequency 694.4 kHz, which develops the sensor to meet the measurement requirements of high-temperature and high-frequency dynamic pressure in the fields like explosive blasting test.

Keywords: micro electro-mechanical system; silicon on insulator inverted-cup piezoresistive pressure sensitive chip; flush-type; pre-tightening force

随着科学技术的发展,军事、工业市场迫切需要具有灵敏度高和高频响特性的耐高温压力传感器实现高温动态压力的测量.目前,耐高温高频响压力传

感器主要有压电式和压阻式两大类.比较典型的压电式传感器有美国 Endevco 公司和瑞士 Kistler 的系列产品,但压电式传感器的信号处理部分比较复

杂,价格昂贵.比较典型的压阻式传感器有美国 Kulite 和 Endevco 的系列产品,如 Kulite 的 XTL-76A-312(M)系列-小型 IS 压力传感器均采用硅隔离(SOI)技术和无引线封装技术,使得产品的外径仅为 10.9 mm,最高使用温度为 204 ℃,最大量程为 21 MPa,而传感器的固有频率典型值^[1]则高达 1.6 MHz.又如 Endevco 公司型号为 Model 8540-500 的压阻式传感器的外径仅为 9.52 mm,其最高使用温度为 260 ℃,最大量程为 3.5 MPa,此时的传感器固有频率典型值为 900 kHz^[2].压阻式传感器的敏感元件因采用微型机械电子系统(MEMS)技术研制,所以成本低、性价比高,可大批量生产.由于耐高温高频响压力传感器往往应用于军事或高端工业领域,所以国外对该种传感器的相关技术实施长期封锁,甚至禁运产品.为了解决我国军工等国防领域对高温高频压力测量的难题,本文研制出了倒杯式耐高温高频响压阻式压力传感器,其具有耐高温、高频响、高精度等特点.

1 SOI 倒杯式耐高温压阻力敏芯片的制作

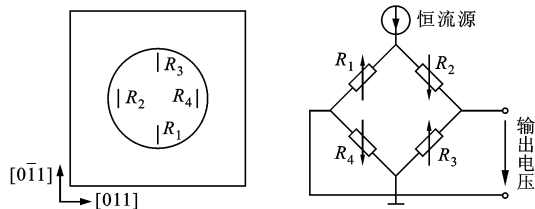
1.1 力敏芯片的版图设计

单晶硅除有明显的压阻效应外,其机械性能也十分优良,杨氏模量为 167 GPa,断裂强度为 3 GPa,无滞后、无蠕变和塑性形变,本征固有频率很高,特别适宜于制造高频响力敏元件.利用(100)晶面 SOI 单晶硅材料的优良力学和电学特性^[3-4],采用 MEMS 技术和集成电路工艺制作了尺寸为 5 mm×5 mm×0.4 mm 的倒杯式耐高温压阻力敏芯片^[5],其设计量程为 25 MPa,版图如图 1 所示,图中圆圈内为有效工作膜片,直径为 2 mm,圆圈外为固支边界.电阻条的有效长度均沿着[011]晶向,根据压阻效应,4 个具有相同阻值的力敏电阻条组成如图 2 所示的惠斯登全桥检测电路.

1.2 力敏芯片的制作工艺

SOI 倒杯式耐高温压阻力敏芯片的主要制作工艺^[6-9]如下.

(1)力敏芯片的原始材料是 n 型(100)晶面 SOI 单晶硅材料,顶层 Si 的厚度为 1.5 μm.在离子注入之前,先采用热氧化工艺制作厚度为 50 nm 的氧化硅作为注入氧化层,可有效抑制在单晶硅表面进行离子注入时的沟道效应,使注入的均匀性从 1.5% 提高到 0.75%.



R_1 、 R_2 、 R_3 、 R_4 :结构尺寸完全相同的力敏电阻条

图 1 芯片的设计版图 图 2 惠斯登全桥检测电路

(2)由于 p 型电阻具有高的压阻系数和低的温度系数,因此采用 B_2O_3 扩散后得到顶层硅的硼离子浓度为 $2 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$.清洗后,将薄层光刻胶旋涂在上表面,经电阻条掩膜版及光刻工艺后,采用等离子刻蚀工艺形成了有 4 个力敏电阻条的测量电路.4 个力敏电阻条均采用三折结构,以提高灵敏度输出.单折电阻条的宽度为 12.5 μm,内部间隙为 15 μm,有效总长为 750 μm,电阻条的阻值为 1 kΩ.为了消除晶格缺陷和提高顶层硅的导电能力,需要在 1 100 ℃下的 N_2 环境中进行 30 min 的退火和激活工艺.

(3)为了消除应力失配并提高敏感元件的稳定性,在 1 100 ℃的 O_2 环境下对力敏芯片氧化 30 min,在顶部测量硅层上形成厚为 400 nm 的 SiO_2 层,紧接着通过低压气相沉积(LPCVD)工艺,在顶部 SiO_2 层上形成厚为 120 nm 的 Si_3N_4 层.

(4)为了提高内引线的高温可靠性,经过电阻孔掩膜版光刻形成电阻孔,然后依次溅射形成 Ti-Pt-Au 引线层.根据金属引线掩膜版,通过光刻和刻蚀工艺,形成内部梁式引线层,将 4 个力敏电阻条连接成半开环惠斯登全桥.把力敏芯片置入 550~700 ℃的真空环境中保持 30 min 后,再进行金属化处理,以形成良好的欧姆接触.

(5)根据力敏芯片的设计量程,采用自旋转磨削工艺对整个晶圆进行减薄、抛光,通过控制工艺参数使减薄后晶圆的表面粗糙度小于 0.05 μm,表面损伤层厚度小于 0.3 μm,总厚度误差小于 5 μm,平面度^[10]小于 2 μm.由于损伤层厚度会影响力敏芯片的使用寿命,而根据周边固支圆膜片的应力应变和固有频率的理论计算公式^[11],总厚度误差和平面度不仅影响力敏芯片灵敏度和固有频率的一致性,而且还恶化了力敏芯片的非线性误差,因此必须对以上参数进行控制.最后,对硅晶圆进行划片,形成单个的力敏芯片,如图 3 所示.

根据单晶硅的压阻效应可知,当力敏芯片发生

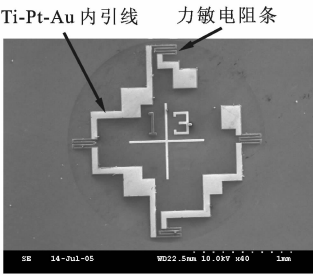


图3 力敏芯片的表面形貌

应变时,惠斯登全桥上各电阻条阻值的变化率^[12-13]分别为

$$\left. \begin{aligned} \frac{\Delta R_1}{R_1} = \frac{\Delta R_3}{R_3} &= \frac{1}{2} \pi_{44} (\sigma_t - \sigma_r) \\ \frac{\Delta R_2}{R_2} = \frac{\Delta R_4}{R_4} &= \frac{1}{2} \pi_{44} (\sigma_r - \sigma_t) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: σ_r 、 σ_t 分别为径向和切向的应力; π_{44} 为剪切压阻系数.当电桥采用恒流源*i* 做激励源时,则电桥的输出电压为 $0.5iR_B\pi_{44}|\sigma_t - \sigma_r|$.

2 传感器的结构设计与模拟分析

图4 为耐高温高频响压阻式压力传感器的结构图.通过静电键合工艺,将 SOI 倒杯式耐高温压阻力敏芯片封装到玻璃环上,然后经玻璃浆料烧结工艺或高温胶黏剂装配到齐平式基座上^[14].传感器的结构可使被测介质直接作用在力敏芯片上,从而减小了管腔效应对传感器动态特性的影响,使传感器的固有频率尽量接近于力敏芯片的本征固有频率.金丝通过热压焊等金丝球焊工艺,从力敏芯片的焊盘上焊接到聚乙烯转接板上,高温电缆线再从转接板上引出并用锁线帽进行固定.传感器的实物照片如图5所示.

由于该传感器采用齐平式封装结构,被测流体直接作用到 SOI 倒杯式耐高温压阻式力敏芯片上,因此传感器的动态特性主要由力敏芯片决定.根据

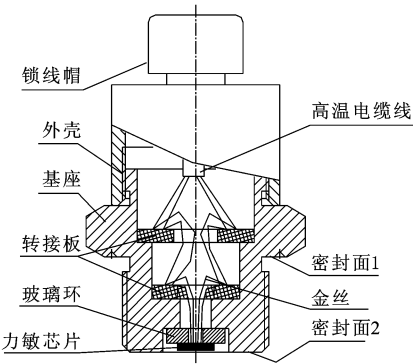


图4 传感器的结构

力敏芯片的外形尺寸及其工作原理,采用 Solid186 单元进行 ANSYS 建模,通过模态分析得出力敏芯片的固有频率^[15]为 985.832 kHz.力敏芯片的一阶模态振型图如图6所示.



图5 传感器实物

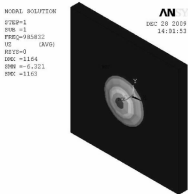


图6 力敏芯片的一阶模态振型图

力敏芯片位于齐平式基座的螺纹内部,下面主要通过模拟仿真和实验来验证螺纹预紧力对传感器零位输出的影响.SOI 倒杯式耐高温压阻式力敏芯片的尺寸为 5 mm×5 mm×0.4 mm,为了简化计算,将方形力敏芯片的外形简化为圆形,外径为 7 mm.该尺寸的力敏芯片可承受的最大压力载荷为 25 MPa,由于力敏芯片具有 200%的过载能力,因此取 50 MPa.另外,玻璃环的厚度为 2 mm,玻璃环封接处金属基座的厚度设计为 3 mm.为了使传感器能够密封住流体的压力而正常工作,则螺纹预紧力^[16]必须满足

$$F \geq k p_M A \quad (2)$$

式中: p_M 表示被密封流体的压力; A 表示密封面面积; k 表示安全系数,通常取 1.5~1.8.

当传感器采用紫铜垫在图4所示的密封面2处进行螺纹密封时,为了分析预紧力对传感器性能的影响,简化模型如图7所示.为了达到 50 MPa 的密封要求,参考式(2)得到

$$F = 7.068\ 6\ \text{kN}$$

$$p_j = F/A = 30\ \text{MPa}$$

式中: p_j 为预紧压力.为了分析预紧力的影响,在图7所示的简化模型上分别施加的 p_j 为 30、50 和 70

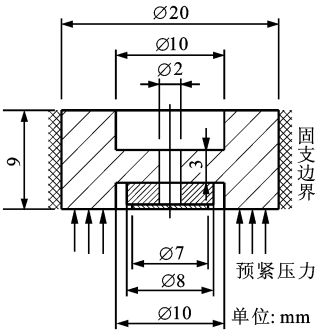


图7 安装预紧力的简化模型

MPa,通过 ANSYS 分析,得到如图 8 所示的形变应力云图。力敏芯片上的表面径向应力与切向应力差值的绝对值如图 9 所示,其中力敏电阻中心位置($r=0.837\ 5\ \text{mm}$)处的径向应力与切向应力的差值分别约为 0.026 9、0.044 8 和 0.062 5 MPa。可见,随着预紧压力的增大,电阻的阻值变化率增大,从而改变了传感器的零位输出。根据硅的压阻效应,得到不同预紧压力作用下(见表 1)的传感器零位输出电压为

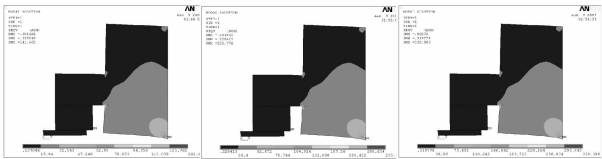
$$|\Delta V_z|=|\frac{1}{2}\pi_{44}(\sigma_r-\sigma_t)R_B I_B|$$
$$\pi_{44}=66\times 10^{-11}\ \text{m}^2/\text{N}$$

(3)

式中: R_B 表示桥臂阻值,取为 1 k Ω ; I_B 表示电桥恒流源激励,取为 5 mA。

表 1 预紧压力与传感器零位输出的关系

p_j/MPa	30	50	70
$ \sigma_r-\sigma_t /\text{MPa}$	0.026 9	0.044 8	0.062 5
$ \Delta V_z /\text{mV}$	0.044	0.074	0.103



(a) $p_j=30\ \text{MPa}$ (b) $p_j=50\ \text{MPa}$ (c) $p_j=70\ \text{MPa}$
图 8 简化模型截面的应力云图

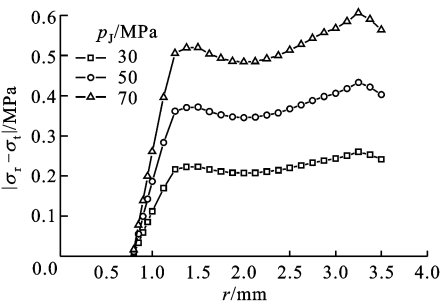


图 9 径向应力与切向应力的差值曲线

3 实验及数据分析

3.1 传感器的静态特性

将研制的耐高温高频响压阻式压力传感器安装到引压管上,在引压管的一端安装传感器,并通过 GDJ-225 高低温交变实验箱的测试口伸入到 200 $^{\circ}\text{C}$ 的高温内腔中,为传感器提供高温环境。引压管的另一端安装 YS-600T 标准活塞压力计,提供标准压力

对传感器进行校准。根据 JJG 860-1994 压力传感器(静态)检验规程对传感器进行校准,测得的校准数据经最小二乘拟合,得到如图 10 所示的静态特性^[11]输入输出曲线,计算求得传感器的非线性度为 0.081% FS、重复性为 0.03% FS、迟滞为 0.03% FS、精确度为 $\pm 0.114\%$ FS。

3.2 传感器的动态特性

在某研究所,采用激波管方式对耐高温高频响压阻式压力传感器进行了动态性能^[11]实验分析,使用的主要实验设备有激波管、Tektronix TDS 5054 型数字示波器、IWATSU DA-2B 型高增益放大器和 HH1710 型双路稳压稳流电源。实验时,为了不影响波形的质量,传感器安装在低压腔端面的法兰盘上,并用真空硅脂将传感器端面的缝隙填满。激波管的破膜冲击压力为 5 MPa,传感器信号经 IWATSU DA-2B 型高增益放大器放大后,由 TDS5054 型数字示波器记录响应波形(见图 11),从图中读出传感器的响应频率约为 694.4 kHz,可见传感器具有很高的固有频率。

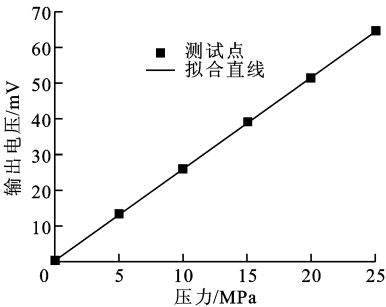


图 10 静态特性的输入输出曲线

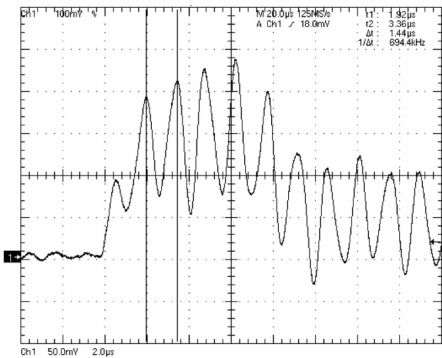


图 11 示波器显示的传感器动态响应曲线

3.3 预紧力实验

为了验证预紧力对传感器零位输出的影响,采用 TOHNICHI 公司的 QL50N 力矩扳手进行拧紧实验。根据预紧力、预紧压力与安装力矩之间的关

系,得出 30、50 和 70 MPa 的预紧压力^[16]对应的力矩 M 分别为 13.373、22.288 和 31.204 N·m,取整后,分别以 14、23 和 32 N·m 的力矩将这 3 只传感器的螺纹拧紧到 YS-600T 标准活塞压力计的测试接口端,通过 F45 台式万用表分别测量了 3 只传感器零位输出信号的绝对值改变量,记为 ξ_1 、 ξ_2 、 ξ_3 。从表 2 中的数据可以看出,预紧力的变化对 3 只传感器的零位输出均有较大影响,但预紧力对不同传感器的零位输出的影响有所区别,且与理论仿真的结果也有差异,这可能是由封装工艺和封装材料导致的。由于预紧力给传感器施加的额外应力是不稳定的,从而影响了传感器的长期稳定性。因此,还需要对传感器的结构进行优化设计,以避免预紧力的影响。

表 2 不同安装力矩对传感器零位输出的影响			
$M/\text{N}\cdot\text{m}$	14	23	32
ξ_1/mV	0.039	0.045	0.052
ξ_2/mV	0.126	0.132	0.139
ξ_3/mV	0.061	0.070	0.081

4 结 论

本文采用 MEMS 技术制作出了具有高精度和高频响特点的耐高温压力传感器,其敏感元件为 SOI 倒杯式耐高温压阻力敏芯片,具有高频响、高精度、耐高温等特点,在机械结构上采用了齐平式设计,从而避免了管腔效应对传感器动态频响特性的影响。本文从理论和实验角度分析了传感器的频响特性、静态特性以及安装预紧力对传感器性能的影响,根据实验数据的计算结果得到传感器的精确度为 $\pm 0.114\%$ FS,动态响应频率为 694.4 kHz,从而解决了火工品爆破等高温动态压力的测试难题。

参考文献:

[1] Inc. super high temperature low G sensitivity IS pressure transducer: XTEH-10LAC-190 Series [DB/OL]. [2009-01-28]. http://www.kulite.com/pdfs/pdf_Data_Sheets/XTEH-10LAC-190.pdf.

[2] Endevco Corporation. Model 8540 piezoresistive pressure transducer [DB/OL]. [2009-01-28]. <http://www.endevco.com/product/prodpdf/8540-500.pdf>.

[3] DAVID C M, BRAD L B, MICHAEL T D, et al. Characteristics of a commercially available silicon-on-insulator MEMS material [J]. Sensors and Actuators A, 2007(138):130-144.

[4] ANDREAS P, GERTRUD K. Silicon-on-insulator: materials aspects and applications [J]. Solid State Electronics, 2000(44):775-782.

[5] ZHAO Yulong, ZHAO Libo, JIANG Zhuangde. High temperature and frequency pressure sensor based on silicon-on-insulator layers [J]. Measurement Science and Technology, 2006(17):519-523.

[6] ZHAO Yulong, ZHAO Libo, JIANG Zhuangde. A novel high temperature pressure sensor on the basis of SOI layers [J]. Sensors and Actuators: A, 2003(108):108-111.

[7] GUO Shuwen, ERIKSEN H, CHILDRESS K, et al. High temperature smart-cut SOI pressure sensor [J]. Sensors and Actuators: A, 2009(154):255-260.

[8] WU C H, ZORMAN C A, MEHREGANY M. Fabrication and testing of bulk micromachined silicon carbide piezoresistive pressure sensors for high temperature applications [J]. IEEE Sensors Journal, 2006(6):316-324.

[9] CHEN Li, MEHREGANY M. A silicon carbide capacitive pressure sensor for in-cylinder pressure measurement [J]. Sensors and Actuators: A, 2008(145/146):2-8.

[10] 郭东明, 康仁科, 金洙吉. 大尺寸硅片的高效超精密加工技术 [J]. 世界制造技术与装备市场, 2003(1):35-40.

GUO Dongming, KANG Renke, JIN Zhuji. High-productivity ultraprecise machining technique of silicon wafer with dia. over 300 mm [J]. World Manufacturing Engineering & Market, 2003(1):35-40.

[11] 李科杰. 新编传感器技术手册 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2002:56-96,1046-1062.

[12] RANJIT S, LOW L N, HO S S, et al. A silicon piezoresistive pressure sensor [C]//The First IEEE International Workshop on Electronic Design. Los Alamitos, CA, USA: IEEE Computer Society, 2002:1-4.

[13] BAO Minhang. Micro mechanical transducers: pressure sensors, accelerometers and gyroscopes [M]. Amsterdam, The Netherlands: Elsevier, 2000:257-262.

[14] 中国集成电路大全编委会. 中国集成电路大全: 集成电路封装 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1993:193-269.

[15] 王新敏. ANSYS 工程结构数值分析 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2009:340-409,499-518.

[16] 卜炎. 螺纹联接设计与计算 [M]. 北京: 高等教育出版社, 1995:102-143.

(编辑 管咏梅)