

耐高温硅隔离压阻力敏芯片的研究

赵立波^{1,2}, 赵玉龙¹, 方续东¹, 李建波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技术制作出了具有高精度、高频响特点的耐高温硅隔离压阻力敏芯片. 根据压阻力敏芯片的版图设计结构, 基于弹性薄板小挠度弯曲理论计算分析了压阻力敏芯片的结构尺寸和固有频率. 采用静电键合工艺将压阻力敏芯片封装在硼硅玻璃环上, 形成倒杯式弹性敏感单元, 通过有限元仿真分析了玻璃环对压阻力敏芯片性能的影响. 根据温度实验数据及计算结果, 得到压阻力敏芯片各温度点的热零点漂移的绝对值均小于 $0.02\% \text{ FS} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$, 说明该压阻力敏芯片的准确度等级优于 $0.1\% \text{ FS} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$, 且零点稳定性好.

关键词: 微型机械电子系统; 硅隔离压阻力敏芯片; 硼硅玻璃环

中图分类号: TP212 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2010)09-0059-05

High Temperature Silicon-on-Insulator Piezoresistive Pressure Sensitive Chip

ZHAO Libo^{1,2}, ZHAO Yulong¹, FANG Xudong¹, LI Jianbo¹, 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: High temperature silicon-on-insulator piezoresistive pressure sensitive chip, which possesses the properties of high accuracy and high response frequency, is developed by micro electro-mechanical system technology. According to the sensitive chip mask structure, the structural dimensions and natural frequency of the sensitive chip are evaluated and analyzed based on small deflection bending theory of elastic thin plate. The sensitive chip is packaged on pyrex glass ring to form inverted-cup type elastic-sensitive cell. The pyrex glass ring effect on performance of the sensitive chip is simulated by finite element method. According to the temperatural experiment data and calculation, the absolute values of thermal zero drifts of the sensitive chip under various temperature are all less than $0.02\% \text{ FS} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$, which demonstrates that the accuracy of the sensitive chip gets better than $0.1\% \text{ FS} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ with fine zero stability.

Keywords: micro electro-mechanical system; silicon-on-insulator piezoresistive pressure sensitive chip; pyrex glass ring

压力传感器在航空航天、军事、工业方面有着广泛的应用,但随着科技的进步和测试环境条件的日益恶劣,越来越需要压力传感器具有耐高温、高频响、高性价比等特性. 目前,具有以上特性的耐高温高频响压力传感器的主要机理有压电式和压阻式两大类. 压阻式压力传感器的敏感元件因采用微型机械电子系统(MEMS)技术和集成电路工艺研制,因

此成本低、性价比高,可实现大批量生产,被广泛地阵列化应用. 对于耐高温高频响压阻式力敏芯片的实用化研究,国外的典型产品主要有美国 Kulite 公司和 Endevco 公司的系列产品,如 Kulite 公司的 XTEH-10LAC-190(M)型系列产品的压阻式力敏芯片采用硅隔离(SOI)技术和 MEMS 技术制作^[1],其最高使用温度为 538°C ,最大压力量程可达

21 MPa,经无引线技术封装后传感器固有频率的典型值可高达 1.65 MHz. 目前,国内成熟的耐高温高频响传感器并不多见,对于耐高温压阻式力敏芯片的研究,主要有复旦大学、沈阳仪表科学研究所、天津大学、西安电子科技大学、北京大学、中国电子科技集团公司第 49 研究所、上海微系统与信息技术研究所以及西安交通大学等单位,并且集中于对压阻式力敏芯片耐高温特性的研究. 耐高温高频响压力传感器主要应用于军事或高端工业领域,国外对此类传感器的力敏元件的制作技术和封装工艺、测试补偿技术等实施长期封锁,甚至禁运产品. 为了解决我国石油化工、航空航天、军工等领域对耐高温高频响压力测量的难题,本文重点对 SOI 压阻力敏芯片的结构设计和仿真分析进行了研究,提出了制作工艺步骤,并对它的温度性能进行了实验分析.

1 SOI 压阻力敏芯片的结构设计及仿真分析

1.1 版图设计

单晶硅除了有明显的压阻效应外,还具有十分优良的机械性能,其杨氏模量为 167 GPa,断裂强度为 3 GPa,无滞后、无蠕变和塑性形变. 由于单晶硅的密度仅为 $2.33 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$,其本征固有频率也很高,因此特别适宜于制作高频响力敏元件. 利用(100)晶面 SOI 单晶硅材料的优良力学和电学特性^[2-3],采用 MEMS 技术和集成电路工艺制作了尺寸为 5 mm×5 mm 的耐高温 SOI 压阻力敏芯片,其设计压力量程为 25 MPa,版图如图 1 所示^[4]. 图 1 中的圆圈内为有效工作区域,其外为固支边界,其中的 4 个电阻条对称布置在图 1 内圈的边缘处,其有效长度均沿着 $[0\bar{1}1]$ 晶向或 $[011]$ 晶向,由这 4 个具有相同阻值的力敏电阻条组成的检测电路如图 2 所示.

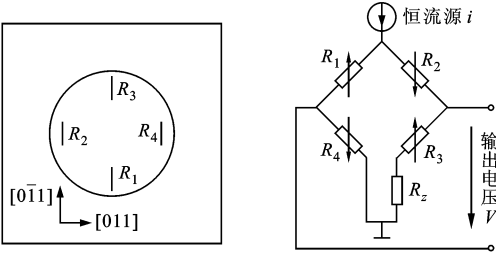


图 1 力敏芯片的设计版图 图 2 惠斯登全桥检测电路

根据单晶硅的压阻效应可知,当压阻力敏芯片发生应变时,惠斯登全桥上各电阻条阻值的变化率^[5-6]分别为

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

式中: σ_r 、 σ_θ 分别为径向和切向的应力; π_{44} 为剪切压阻系数. 当惠斯登全桥检测电路采用恒流源 i 进行激励时,电桥的输出电压为

$$V = 0.5i R \pi_{44} | \sigma_\theta - \sigma_r | \quad (2)$$

1.2 尺寸设计

当耐高温 SOI 压阻力敏芯片与硼硅玻璃环静电键合后,形成了一个周边固支圆膜结构的倒杯式弹性敏感单元,如图 3a、3b 所示. 如果采用齐平封装机械结构,则被测介质可直接与力敏芯片接触,从而避免了管腔效应,实现了高频动态压力的测量. 根据压阻力敏芯片的工作原理,理论上可将弹性敏感单元简化成一个周边固支的轴对称圆膜结构,如图 3c 所示. 该简化模型的结构尺寸决定着耐高温 SOI 压阻力敏芯片的量程,根据力敏芯片的设计量程,基于弹性薄板小挠度弯曲理论,可计算出不同结构的压阻力敏芯片尺寸.

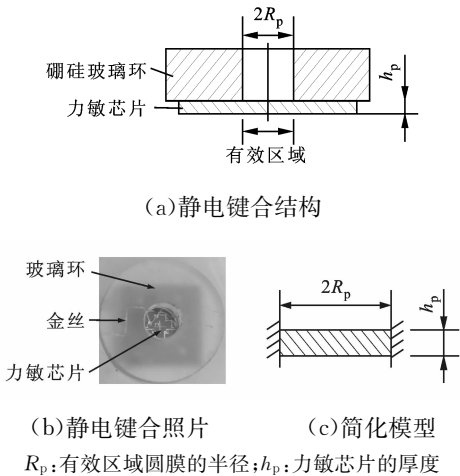


图 3 倒杯式弹性敏感单元

图 4 为 4 个电阻条在压阻力敏芯片圆膜区域中的布置位置,为了保证压阻力敏芯片的线性度及过载保护,通常取压阻力敏芯片的最大应变绝对值不超过 500 个微应变^[7],即 500×10^{-6} ,而对应的等效应力则远小于许用应力,由此得到

$$\left. \begin{aligned} \max(\epsilon_r, \epsilon_\theta) &\leq 500 \times 10^{-6} \\ (\epsilon_r)_{\max} &= \frac{3q_0 R_p^2}{8Eh_p^2} (1 - \nu^2) \leq 500 \times 10^{-6} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中: ϵ_r 、 ϵ_θ 分别为径向应变和切向应变; q_0 为均布压力; E 和 ν 分别为硅材料的弹性模量和泊松比。

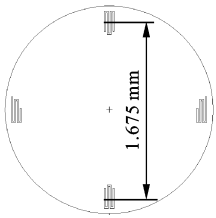


图 4 压阻力敏芯片中电阻条的位置

为了满足弹性薄板理论,需要

$$\frac{h_p}{2R_p} \leq 0.2 \tag{4}$$

为了使压阻力敏芯片具有良好的线性,其最大挠度 $w_{\max}$ 不能太大,一般应使^[8]

$$\left. \begin{aligned} \frac{w_{\max}}{h_p} &= \frac{q_0 R_p^4}{64 D_p h_p} = \frac{3 q_0 R_p^4 (1 - \nu^2)}{16 E h_p^4} \leq 0.1 \\ D_p &= \frac{E h_p^3}{12 (1 - \nu^2)} \end{aligned} \right\} \tag{5}$$

式中: D_p 为圆膜的弯曲刚度。联立式(3)~式(5),整理后得

$$\left. \begin{aligned} q_0 &\leq \frac{4 E h_p^2 \times 10^{-3}}{3 | (1 - \nu^2) (R_p^2 - 3 r^2) |} \\ \frac{h_p}{2 R_p} &\leq 0.2 \\ q_0 &\leq \frac{1.6 E h_p^4}{3 R_p^4 (1 - \nu^2)} \end{aligned} \right\} \tag{6}$$

根据式(6)可求得压阻力敏芯片的量程与结构尺寸的关系。当压阻力敏芯片的设计量程为 25 MPa 时,若其有效区域的直径为 2 mm,则可求得它的厚度为 0.4 mm。

1.3 玻璃环对压阻力敏芯片性能的影响

当静电键合时,硼硅玻璃环的厚度为 2 mm,外径为 8 mm,内径为 2 mm。已知(100)晶面单晶硅的弹性模量为 130 GPa,泊松比为 0.18,弹性极限值为 80 MPa,屈服强度为 7 GPa,硼硅玻璃的弹性模量为 64 GPa,泊松比为 0.25,密度为 2 230 kg/m³。

为了分析玻璃环对压阻力敏芯片性能的影响,首先分析压阻力敏芯片在静电键合之前的应力分布情况。压阻力敏芯片的尺寸为 5 mm×5 mm×0.4 mm,为了简化计算,将方形压阻力敏芯片的外形简化为圆形,外径为 7 mm,其 ANSYS 简化模型如图 5 所示。在压阻力敏芯片上施加 25 MPa 的压力载

荷,求得其上表面在半径方向上(通过电阻条中心)的等效力 σ 、径向应力、切向应力及其差值的分布如图 6 所示^[9]。根据图 6b,得到压阻力敏芯片在上表面力敏电阻条中心位置($r=0.8375$ mm)处的径向应力和切向应力的差值约为-65.32 MPa。

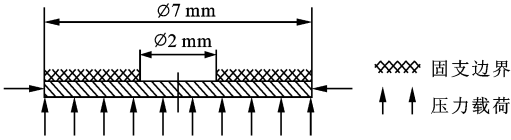
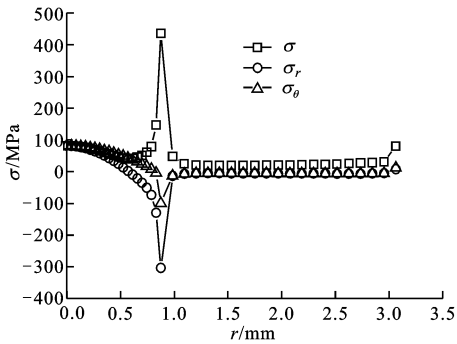
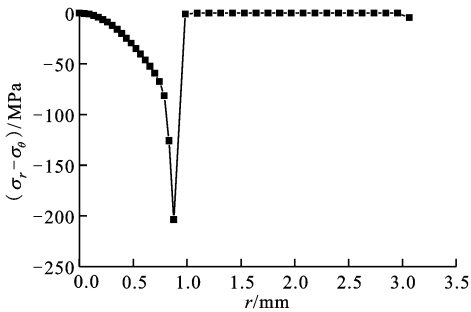


图 5 压阻力敏芯片 ANSYS 简化模型



(a) 应力曲线



(b) 径向应力与切向应力的差值曲线

图 6 静电键合前压阻力敏芯片上表面的应力及差值曲线

采用图 7 所示的模型研究玻璃环对压阻力敏芯片性能的影响,同样施加 25 MPa 的压力载荷,求得压阻力敏芯片上表面在半径方向上(通过电阻条中心)的等效力 σ 、径向应力、切向应力及其差值的分布如图 8 所示。根据图 8b,求得压阻力敏芯片在上

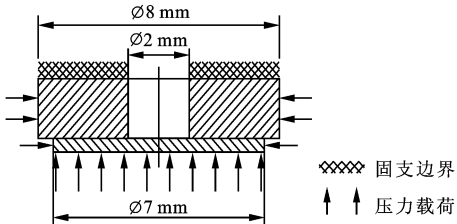
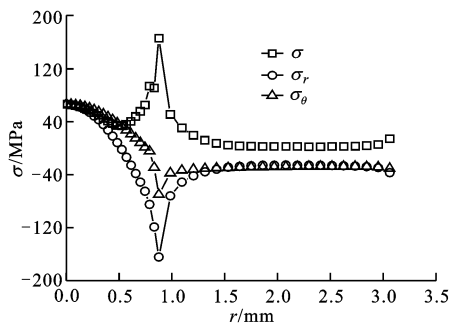
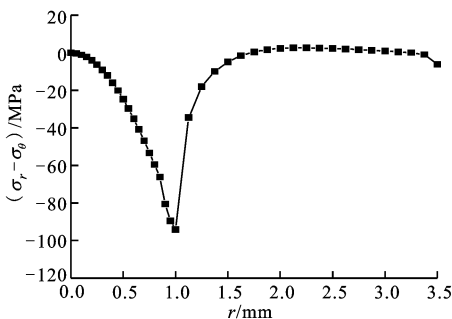


图 7 压阻力敏芯片与玻璃环键合后的简化模型



(a) 应力曲线



(b) 径向应力与切向应力的差值曲线

图 8 静电键合后压阻敏芯片上表面的应力及差值曲线

表面力敏电阻条中心位置($r=0.8375\text{ mm}$)处的径向和切向应力的差值约为 -64.46 MPa 。可见,在相同的压力载荷作用下,玻璃环使得 $|\sigma_r - \sigma_\theta|$ 减小,根据式(2)可知降低了压阻敏芯片的灵敏度输出,但对灵敏度的影响不大。

1.4 固有频率分析

采用 Solid186 单元对耐高温 SOI 压阻力敏芯片进行 ANSYS 建模分析,根据工作原理,通过模态分析得出其固有频率为 985.832 kHz ^[9]。图 9 所示为一阶模态时的 SOI 压阻力敏芯片振型图,该结构尺寸的压阻力敏芯片具有很高的频率,能够满足动态压力测量的要求。

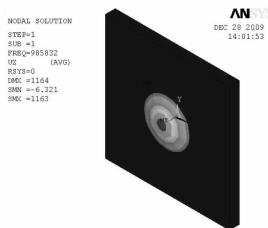


图 9 SOI 压阻力敏芯片的模态振型图

2 SOI 压阻力敏芯片的制作工艺

利用硅的压阻效应和集成电路技术制作的传统扩散硅压阻力敏芯片具有灵敏度高、动态响应快、测量精度高、稳定性好、易于小型化和可大批量生产等

特点,但由于其力敏电阻条与硅基底是 p-n 结隔离,故在使用温度大于 $120\text{ }^\circ\text{C}$ 时,会因 p-n 结产生漏电流而使传感器的性能恶化甚至失效,因此传统的扩散硅压阻力敏芯片难以解决 $120\text{ }^\circ\text{C}$ 以上高温的压力测量。针对石油化工、航空航天、军工等领域在高温 ($120\text{ }^\circ\text{C}$ 以上) 高频条件下的压力测量需求,采用 SOI 技术和 MEMS 技术研制出耐高温 SOI 压阻力敏芯片,其力敏电阻条测量层与硅基底之间采用 SiO_2 绝缘层进行隔离,不存在 p-n 结,从而避免了高温下检测电路与基底之间产生的漏电流,提高了压阻力敏芯片的耐高温特性。

耐高温 SOI 压阻力敏芯片的主要制作工艺有以下几个步骤^[10-13]。

(1) 力敏芯片的原始材料是 n 型(100)晶面 SOI 单晶硅材料,其顶层 Si 的厚度为 $1.5\text{ }\mu\text{m}$ 。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% 。

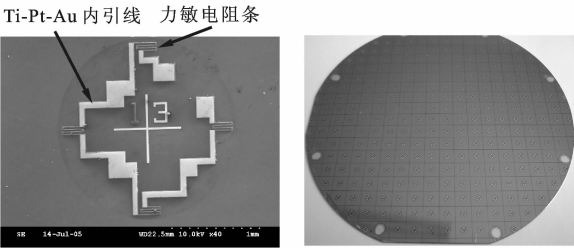
(2) 由于 p 型电阻具有高的压阻系数和低的温度系数,因此采用 B_2O_3 进行离子注入,得到顶层硅的硼离子浓度为 $2\times 10^{20}/\text{cm}^3$ 。将压阻力敏芯片清洗后,在其上表面旋涂薄层光刻胶,经电阻条掩膜版及光刻工艺后,采用等离子刻蚀工艺形成了有 4 个力敏电阻条的测量电路层。将 4 个力敏电阻条均采用三折结构,以提高电路的灵敏度输出。单折电阻条的宽度为 $12.5\text{ }\mu\text{m}$,其内部间隙为 $15\text{ }\mu\text{m}$,其有效总长为 $750\text{ }\mu\text{m}$,电阻条的每方块电阻值为 $20\text{ }\Omega$ 。为了消除晶格缺陷和提高顶层硅的导电能力,需在 $1100\text{ }^\circ\text{C}$ 下的 N_2 环境中,对压阻力敏芯片进行 30 min 的退火和激活工艺。

(3) 在 $1100\text{ }^\circ\text{C}$ 的 O_2 环境下,将压阻力敏芯片氧化 30 min ,在顶部测量电路层上形成厚为 400 nm 的 SiO_2 层,通过低压化学气相沉积(LPCVD),工艺在顶部 SiO_2 层上形成厚度为 120 nm 的 Si_3N_4 层,目的是消除应力失配,以提高压阻力敏芯片的稳定性。

(4) 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,以提高内引线的高温可靠性。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惠斯登全桥,在 $550\sim 700\text{ }^\circ\text{C}$ 下的真空环境中保持 30 min 后进行金属化处理,以形成良好的欧姆接触。

(5) 最后,进行减薄和划片。

图 10 为压阻力敏芯片表面形貌的 SEM 照片及实物照片。



(a)SEM 照片 (b)实物照片(约 100 mm)
图 10 SOI 压阻力敏芯片的形貌

3 温度实验及数据分析

为了评价耐高温 SOI 压阻力敏芯片温度的稳定性,在不同温度下对未经静电键合的压阻力敏芯片进行零点输出的时漂测试^[7].在恒流源为 5 mA 的激励条件下,将压阻力敏芯片放入可提供-55~175 ℃恒定温度环境的 GDJ-225 高低温交变试验箱中,当各点温度 T 达到设置值后,先保温 1 h 使温度场恒定后,再开始记录此温度下的零点输出值.从图 11 中可以看出,各温度点下的压阻力敏芯片随零点输出电压 V_0 的变化不大,因此零点稳定性较好.

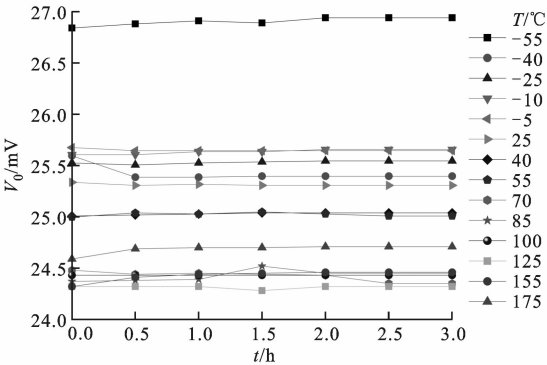


图 11 零点输出的时漂曲线

根据硅的压阻效应和惠斯登全桥的输出电压,结合仿真分析结果,由式(1)和式(2)计算出的压阻力敏芯片的满量程电压输出^[6]为

$$V_m = \frac{1}{2} \pi_{44} | \sigma_r - \sigma_\theta | R_B I_B = 107.778 \text{ mV}$$

式中: π_{44} 取为 $66 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{N}$; R_B 为 1 kΩ 的桥臂电阻; I_B 为 5 mA 的恒流源.

根据测试的时漂数据,参考 GB/T 15478—1995 中关于传感器热零点漂移的 A35 计算公式,以 25 ℃ 下测得的零点输出电压为基准,求得各温度点下的热零点漂移值 α ,其绝对值均小于 $2 \times 10^{-4} \text{ FS}$

$\cdot \text{℃}^{-1}$ (见图 12). 根据中华人民共和国机械行业标准^[14]中的有关规定,准确度等级为 $0.1\% \text{ FS} \cdot \text{℃}^{-1}$ 的传感器对应的热零点漂移值为 $(\pm 3 \times 10^{-4}) \text{ FS} \cdot \text{℃}^{-1}$. 因此,可以说明该压阻力敏芯片的准确度等级优于 $0.1\% \text{ FS}$,其零点稳定性好,且与 Kulite 的 XTEH-10LAC-190(M) 型产品的热零点漂移值(典型值 $1.5 \times 10^{-4} \text{ FS} \cdot \text{℃}^{-1}$)基本相当.

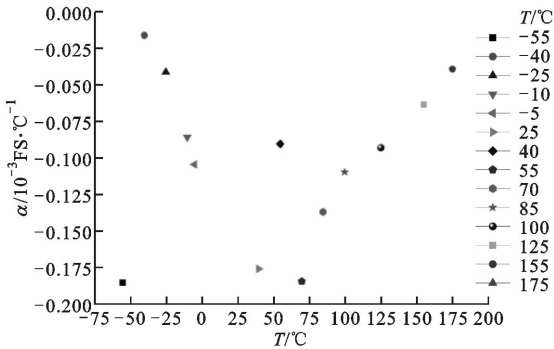


图 12 热零点漂移曲线

4 结 论

本文采用 MEMS 技术和集成电路工艺制作的耐高温 SOI 压阻力敏芯片,具有高频响、高精度、耐高温等特性.从理论角度对压阻力敏芯片的结构尺寸进行设计计算,仿真分析了玻璃环对压阻力敏芯片性能的影响,研究了压阻力敏芯片的固有频率.根据温度实验数据,计算出各温度点下压阻力敏芯片的热零点漂移的绝对值均小于 $2 \times 10^{-4} \text{ FS} \cdot \text{℃}^{-1}$,证明了该压阻力敏芯片的温度稳定性较好.

参考文献:

[1] Kulite Semiconductor Products Inc. Super High Temperature Low G Sensitivity IS Pressure Transducer: XTEH-10LAC-190 Series [EB/OL]. (2009-01-28) [2009-12-30]. http://www.kulite.com/pdfs/pdf_Data_Sheets/XTEH-10LAC-190.pdf.
[2] MEYERS R A. Encyclopedia of physical science and technology: vol. 14 [M]. 3rd ed. Amsterdam, The Netherlands: Elsevier, 2001:805-813.
[3] ANDREAS P, GERTRUD K. Silicon-on-insulator: materials aspects and applications [J]. Solid-State Electronics, 2000(44):775-782.
[4] 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.
[5] RANJIT S, LOW L N, HO S, et al. A silicon pie-

- zoresistive pressure sensor[C]//The First IEEE International Workshop on Electronic Design, New York, USA; Test and Applications(DELTA'02), 2002;1-4.
- [6] BAO Minhang. Micro mechanical transducers; pressure sensors, accelerometers and gyroscopes [M]. Amsterdam, The Netherlands; Elsevier, 2000; 257-262.
- [7] 李科杰. 新编传感器技术手册 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2002;77-93, 145-177, 118-166.
- [8] 刘君华. 智能传感器系统 [M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 1999;35.
- [9] 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.
- [10] ZHAO Yulong, ZHAO Libo, JIANG Zhuangde. A novel high temperature pressure sensor on the basis of SOI layers[J]. Sensors and Actuators, A: Physical, 2003(108):108-111.
- [11] LI C, MEHREGANY M. A silicon carbide capacitive pressure sensor for in-cylinder pressure measurement [J]. Sensors and Actuators, A: Physical, 2008(145/146):2-8.
- [12] WU C, 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.
- [13] GUO Shuwen, ERIKSEN H, CHILDRESS K, et al. High temperature smart-cut SOI pressure sensor [J]. Sensors and Actuators, A: Physical, 2009(154):255-260.
- [14] 刘波, 徐秋玲, 于振毅. 中华人民共和国机械行业标准: 压力传感器(JB/T 6170-2006) [S]. 北京: 机械工业出版社, 2007;4.

(编辑 管咏梅)