

高温压力传感器无引线封装研究

许 姣, 赵晨曦, 杨 健, 郝文昌, 王 建, 尹玉刚
(航天长征火箭技术有限公司 北京 100076)

摘要: 针对高温压力传感器有引线封装在恶劣环境下的弊端, 本文对无引线封装进行研究。首先, 对无引线封装结构进行设计, 并明确了适用无引线封装的高温压力敏感芯片结构; 其次, 研究了耐高温低应力气密封装工艺、低应力黏片工艺、无引线电气互联工艺, 并实现工艺兼容。最后, 将该无引线封装结构应用于高温压力敏感芯片, 评估无引线封装效果。经测试, 无引线封装结构漏率为 $10E-8$ Pa·L/s, 工作温度达 300 °C。本文的研究将拓展高温压力传感器应用领域, 提高传感器恶劣环境的适应性及可靠性。

关键词: 无引线封装; 气密封装; 高温压力传感器

中图分类号: TP212; TN305

文献标志码: A

文章编号: 2095-1000(2023)06-0126-06

DOI: 10.12347/j.ycyk.20230809001

引用格式: 许姣, 赵晨曦, 杨健, 等. 高温压力传感器无引线封装研究[J]. 遥测遥控, 2023, 44(6): 126–131.

Research on leadless packaging for high temperature pressure sensor

XU Jiao, ZHAO Chenxi, YANG Jian, HAO Wenchang, WANG Jian, YIN Yugang
(Aerospace Long March Launch Vehicle Technology CO.,LTD, Beijing 100076, China)

Abstract: In view of the disadvantages of high temperature pressure sensor with lead packaging in harsh environment, this paper researches studies on the leadless packaging. Firstly, the leadless packaging structure is designed and the high temperature pressure sensor chip which is suitable for leadless packaging is clarified. Secondly, the processes such as high temperature low-stress hermetic packaging, low-stress adhesive for chip and leadless electrical connection are studied, and the compatible processes are realized. Finally, the leadless packaging is applied to high temperature pressure sensor chip, and the effect of the packaging is evaluated. The experimental results show that the leadless packaging's leak rate is $10E-8$ Pa·L/s and the working temperature is 300 °C. The research presented in this paper not only will expand the application field of high temperature pressure sensor but also will improve its adaptability and reliability.

Keywords: Leadless packaging; Hermetic packaging; High temperature pressure sensor

Citation: XU Jiao, ZHAO Chenxi, YANG Jian, et al. Research on leadless packaging for high temperature pressure sensor [J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2023, 44(6): 126–131.

引 言

高温压力传感器具有广泛的应用与市场需求, 在军事上可用于喷气发动机、坦克发动机及火箭、导弹等耐热腔体和表面各部分的压力测量, 在民用上可用于测量锅炉、管道、高温反应器内的压力和各种发动机腔体内的压力^[1-3]。应用于以上工况时, 压力传感器不仅需要面临高温(大于等于 300 °C), 还需面临振动、冲击辐射等综合恶劣环境^[4-7]。随着微机电系统(Micro-Electro-Mechanical

Systems, MEMS)技术的发展, 基于MEMS技术的高温压力传感器受到工业和科研人员的青睐, 取得了长足发展, 并逐渐占领了压力传感器市场^[8,9]。

在压力传感器传统封装中, 通常采用引线键合的方式将传感器敏感芯片信号引至封装结构上, 只能测量绝缘压力介质, 且在恶劣环境下, 金属引线会出现氧化、电阻增大等问题。相对于传统铝丝或金丝的引线互连技术, 无引线技术克服了其抗振动冲击小、耐腐蚀差、稳定性低、体积大等缺点^[10]。

经过几十年的发展,目前MEMS压力敏感芯片技术已经相当成熟,但是在高温压力测量领域,很多芯片却没有作为产品得到实际应用,主要是因为还没有解决适应恶劣条件下的封装问题。美国NASA等著名研究机构和Kulite等制造商在高温微系统无引线封装技术方面已经比较先进,国内该领域的研究起步较晚^[1]。

为了提高传感器的介质兼容性,拓展其应用领域,进一步提高传感器恶劣环境的适应性及可靠性,必须解决传感器有引线电气封装的难题。本文首先介绍小型化无引线封装的挑战,其次对压力传感器的小型化无引线封装结构进行设计,最后通过封装材料、工艺兼容性研究等方面来实现小型化无引线封装。本文的小型化无引线封装研究将为压力传感器尤其是高温压力传感器的封装奠定基础。

1 小型化无引线封装挑战

1.1 无引线与有引线封装对比

压阻式压力传感器的封装形式多为带引线的充油隔离式结构,如图1(a)所示。充油隔离是为了将压力介质与压力敏感芯片隔离,起到保护压力敏感芯片的作用,这种充油隔离式结构具有体积大和耐高温能力差的缺点^[12,13],不适用于小体积和耐高温的场合。

压阻式压力传感器的另外一种带引线结构为非充油式结构,如图1(b)所示,该种结构的压力敏感芯片封装形式同充油式结构的相似,体积可以很小,可耐高温,但由于压力敏感芯片外露,引线也外露,会不耐腐蚀,稳定性差^[14]。

压力传感器的无引线封装结构,如图1(c)所示,将敏感元件的电极直接与管壳组件上的管脚紧密接触的同时与管壳进行导电密封,取消了芯片与引线柱之间的软引线连接,形成导电的无引线封装结构。该无引线封装结构的优势在于:首先,无须充油,有效解决了含油封装压力传感器中硅油耐温差的问题;其次,取消了金丝等软引线连接,避免了金属引线在高温条件下出现氧化、电阻增大等问题,且无引线技术克服了其抗振动冲击小等缺点;最后,取消软引线连接及充油,该封装结构还具有小型化特点。

发展适应恶劣环境的封装工艺的要点有两个:一是为芯片提供可靠的机械、电气连接,二是保

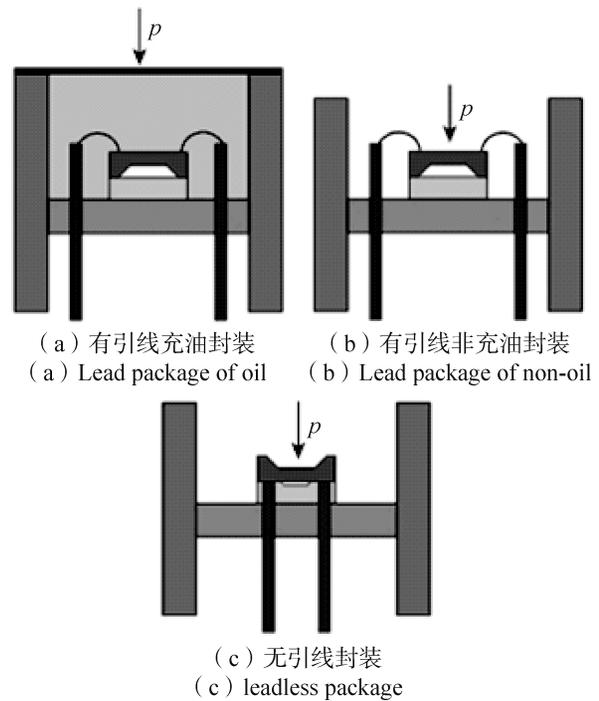


图1 典型压力传感器敏感元件封装方式

Fig. 1 Typical package of pressure sensor sensitive element

护芯片不受恶劣环境破坏。因此,压力传感器的小型化无引线封装成为新的研究方向和重点。

1.2 适用于无引线封装的压力敏感芯片结构

根据图1(c)中小型化无引线封装结构,通过分析,可得出适用于无引线封装结构的压力敏感芯片须满足如下要求^[15]:

① 压力敏感芯片为背面感压型,即其背部直接与被测压强介质接触;

② 压力敏感芯片的正面有密封空腔,且敏感芯片的电极通过其对应的预制通孔显现。

典型的可用于无引线封装的SOI压阻式压力敏感芯片结构^[16]如图2所示。

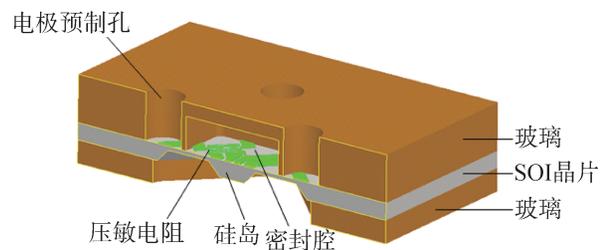


图2 典型的可用于无引线封装的SOI压阻式压力敏感芯片结构

Fig. 2 Typical SOI pressure sensitive chip for leadless package

2 小型化无引线封装设计

2.1 低应力耐高温气密封装设计

为了提高传感器的可靠性和抗干扰能力, 传感器适宜采用密封结构^[17]。针对典型的 SOI 压阻式高温压力传感器的无引线封装, 低应力高温气密性封装决定了压力传感器能否在高温环境下长期稳定工作。为了克服高温引起的热应力对敏感芯片性能的影响, 主要从材料选择上优化封装结构的设计。

在材料选择方面, 所用材料必须具有良好的高温稳定性以及热匹配特性, 并尽量减少使用的材料类型, 减少热应力的产生。材料高温性能主要指其机械性能, 在高温环境中仍能具有一定的强度, 承受一定的冲击振动等; 材料热膨胀系数的匹配能有效地降低热应力, 减小热应力引起的信号偏差^[18,19]。

低应力高温气密封装结构为主要实现的部分结构, 通过玻璃密封方式实现可代合金外壳、玻璃基座和可代插针三者之间的气密连接, 满足高温环境气密性的需求^[20]。材料的物理性能如表 1 所示, 即从材料选择方面, 保证封装结构的高温稳定特性。

表 1 材料物理性能
Table 1 Physical properties

性能	硅(Si)	玻璃	可伐(Kovar)
热导率/(W·m·K)	149	20	17.3
线膨胀系数/(10 ⁻⁶ /°C)	3.5~4	4.0	5.8
熔点/°C	1 414	2 200	1 450

低应力耐高温气密性封装件示意图及实物图如图 3 所示。

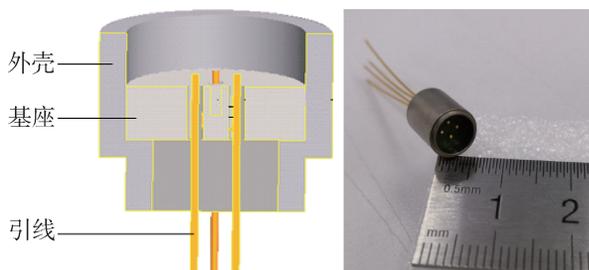


图 3 低应力高温气密封装件
Fig.3 Low-stress hermetic package

2.2 无引线封装结构设计

通过绝缘浆料将压力敏感芯片黏接在低应力气密封装的基座上, 同时采用导电浆料将芯片的电极与低应力气密封装件的可发插针相连, 从而实现电气互联。根据压力敏感芯片黏合结构中的材料、衬底材料、插针材料, 选择热膨胀系数相匹配的非导电浆料和导电浆料, 以降低热应力对输出的影响^[21-23]。无引线封装结构示意图如图 4 所示。

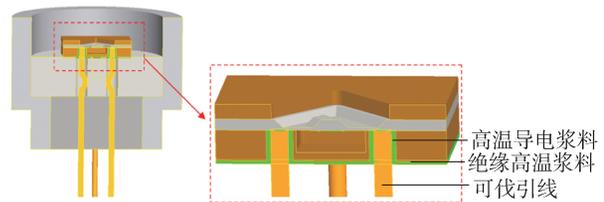


图 4 SOI 压阻式压力敏感芯片无引线封装结构
Fig.4 Leadless package of SOI piezoresistive pressure sensitive chip

3 小型化无引线封装工艺实现

3.1 绝缘高温浆料丝网印刷工艺研究

压力敏感芯片与玻璃基座的高可靠固连选择使用绝缘高温浆料贴片工艺, 绝缘高温浆料的厚度直接关系到封装的应力。选用某牌号的绝缘玻璃浆料, 其材料特性如表 2 所示, 工作温度达 300 °C。

表 2 绝缘浆料材料特性
Table 2 Glass slurry's characteristics

膨胀系数/ (10 ⁻⁶ /°C)	转变点/ (Tg/°C)	软化点/ (Ts/°C)	封接温 度/°C	工作温度 /°C
4.4	450	490	550~600	300~400

采用丝网印刷的方式实现绝缘高温浆料在压力敏感芯片上的涂覆, 通常图形化后的浆料厚度为 60 μm~100 μm。图 5 为高温玻璃浆料预烧后的显微镜图, 从图中可看出, 预烧后的玻璃浆料质量良好, 无空洞。

3.2 高温导电浆料填充工艺研究

压力敏感芯片上的金属电极与低应力耐高温气密封装件管座上的引线的电连接采用高温导电浆料填充工艺。高温导电浆料要求固化温度与绝缘浆料的固化温度一致, 工作温度大于 300 °C, 填充后收缩量小^[24]。由于小型化压力敏感芯片尺寸为

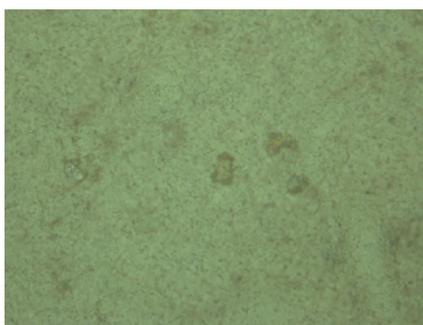


图5 高温玻璃浆料预烧后的显微镜图
Fig.5 Glass slurry's surface morphology

1.6 mm×1.6 mm, 电极预制孔的直径为0.3 mm, 深度为0.5 mm; 采用传统的接触式点胶工艺无法实现微小孔径胶量的精确控制, 若点胶过多溢出孔径, 使得压力敏感芯片4个电极之间短路, 从而导致芯片失效。通过对点胶工艺研究, 采用喷射点胶法可实现无须停止的“飞行中”喷射点胶, 将精确的胶黏剂以点、线和图形的方式喷射出。图6为喷射点胶设备及在直径0.3 mm、深0.4 mm孔内点胶后实物图。

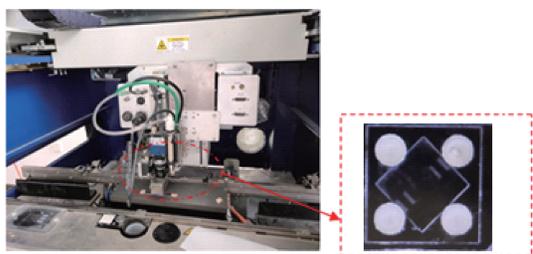


图6 喷射式点胶设备及压力芯片点胶实物图
Fig.6 Jet dispensing glue equipment and glue inside hole of pressure sensitive chip

3.3 低应力黏接及电气互联工艺串联研究

采用微组装装置, 将丝印有绝缘高温浆料的压力敏感芯片的4个电极预制孔与低应力耐高温气密封装件的4个插针对应连接。采用设计好的加压装置给予封接件一定的压力, 两种浆料键合工艺可在同样的温度及气氛环境下同时烧结成型, 减少复杂性、降低成本、提升可靠性。在烧结的升温 and 降温过程中, 应严格控制升温和降温速率在5 K/min之内, 烧结工艺曲线如图7所示, 最佳的烧结工艺参数可降低封装界面的残余应力, 确保高温条件下敏感芯片与管壳底座及引线长久稳定刚性及电性互连。

针对典型的SOI压阻式压力敏感芯片, 采用绝

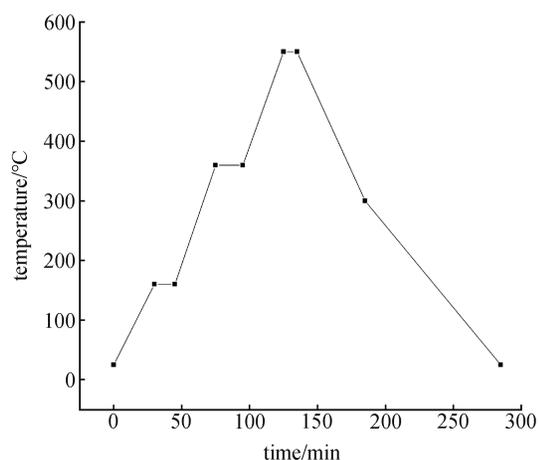


图7 烧结曲线

Fig.7 Sintering process curve

缘高温浆料和导电浆料的工艺串联实现黏接和电气互联, 从而实现压力敏感芯片的无引线封装, 实物图如图8所示。

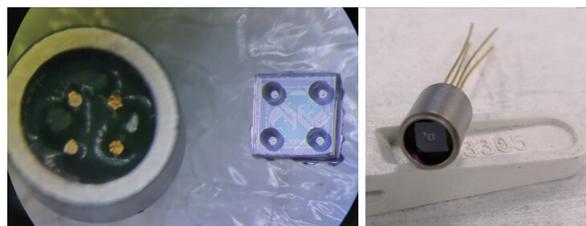


图8 SOI压阻式压力敏感芯片无引线封装
Fig.8 Leadless package of SOI piezoresistive pressure sensor sensitive element

4 无引线封装性能评估

采用氦质谱检漏仪对无引线封装组件进行漏率测试, 漏率为 $10 \text{ E-}8 \text{ Pa} \cdot \text{L/s}$, 气密性满足绝压传感器使用要求。

对无引线封装组件进行整机封装形成无引线高温压力传感器, 如图9所示, 传感器量程为0~170 kPa(绝压), 测试温度为 $-40 \text{ }^\circ\text{C}$ 、 $25 \text{ }^\circ\text{C}$ 、 $300 \text{ }^\circ\text{C}$, 测试压力点为0 kPa~170 kPa内选择包括零点和满量压力点的6个等分点。得到不同温度下输出曲线如图10所示。

根据《压力传感器静态性能不确定度计算方法 QJ 28A-1998》, 重复性是指传感器在相同的工作条件下, 输入按同一方向作全测量范围连续变动多次时, 特性曲线的不一致性, 计算公式如式(1)所示:

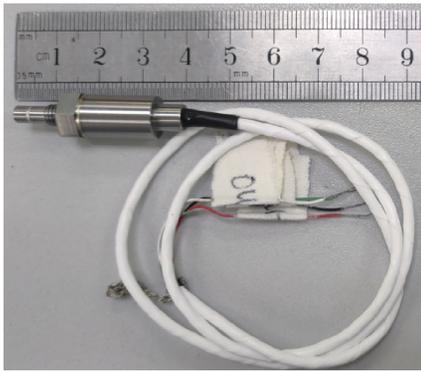


图 9 无引线封装的 SOI 压阻式压力传感器
Fig.9 Leadless package of SOI pressure sensor

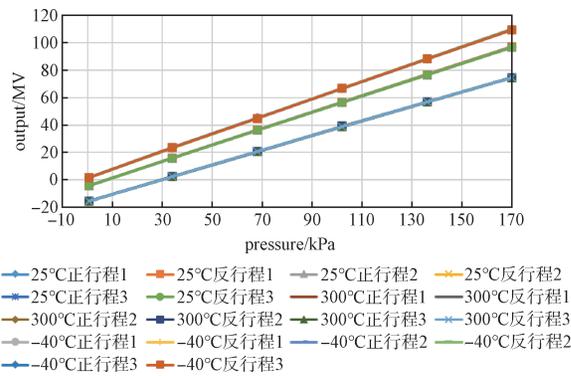


图 10 传感器不同温度下测试曲线
Fig.10 Output characteristic curve

$$\delta_R = \frac{t_{0.95} S_{\max}}{Y_{FS}} \times 100\% \quad (1)$$

式中, S_{\max} 是正反行程各校准点子样标准偏差的最大值, $t_{0.95}$ 为置信度为 95% 的 t 分布因子, Y_{FS} 为室温时满量程输出。

根据《压力传感器通用规范 GJB204409A-201》, 热零点漂移是指将传感器放入高低温试验箱中, 分别在室温、上限工作温度、下限工作温度各恒温 1 h, 记录上述温度点的零点输出值。热灵敏度漂移是指将传感器放入高低温试验箱中, 分别在室温、上限工作温度、下限工作温度各恒温 1 h, 记录上述温度点的零点和满量程输出值热零点漂移计算公式如式(2)所示, 热灵敏度漂移的计算公式如式(3)所示。

$$\alpha = \frac{|Y_L(t_2) - Y_L(t_1)|}{Y_{FS} \times (t_2 - t_1)} \times 100\% \quad (2)$$

$$\beta = \frac{|[Y_H(t_2) - Y_L(t_2)] - [Y_H(t_1) - Y_L(t_1)]|}{Y_{FS} \times (t_2 - t_1)} \times 100\% \quad (3)$$

式中, α 为热零点漂移, 单位为 $\%/^{\circ}\text{C}$; β 为热灵敏度漂移, 单位为 $\%/^{\circ}\text{C}$; $Y_L(t_2)$ 为上限温度时零点输

出值; $Y_L(t_1)$ 为下限工作温度时零点输出值; $Y_H(t_2)$ 为上限温度时满量程输出值; $Y_H(t_1)$ 为下限工作温度时满量程输出值; Y_{FS} 为室温时满量程输出; t_2 为上限工作温度; t_1 为下限工作温度。

传感器在测试时, 上限工作温度 t_2 为 300°C , 下限工作温度 t_1 为 -40°C 。通过计算得出传感器原理样机的常温重复性误差为 0.3%, 300°C 高温重复性误差为: 0.77%, -40°C 低温重复性误差为: 0.85%, 热零点漂移为 4.9%/100 $^{\circ}\text{C}$, 热灵敏度漂移为 5.1%/100 $^{\circ}\text{C}$ 。无引线封装的高温压力传感器原理样机的测试数据表明: 研制的无引线封装满足 300°C 高温压力传感器的封装需求。

5 结束语

本文对比分析了压力传感器的有引线封装、充油封装和无引线封装, 提出了小型化无引线封装的优势和挑战, 明确了适用无引线封装的压力敏感芯片结构。针对典型的 SOI 压阻式压力敏感芯片的无引线封装, 研究了低应力耐高温气密封装和无引线封装结构, 并通过对高温绝缘浆料和导电浆料的单项工艺和工艺串联进行研究, 实现了 SOI 压阻式压力敏感芯片的无引线封装; 测试结果表明: 研制的无引线封装满足 300°C 高温压力传感器的封装需求。本文将为无引线封装高温压力传感器的国产化研究奠定基础。

参考文献

- [1] 宋宗炎, 邹江波. 航天飞行器中的测控仪表传感器技术[J]. 遥测遥控, 2007, 28(Z): 1-9.
SONG Zongyan, ZOU Jiangbo. Techniques of TT & C sensor in spacecrafts[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2007, 28(Sup.): 1-9.
- [2] 王振华, 王亮. 航空发动机试验测试技术发展探讨[J]. 航空发动机, 2014, 40(6): 47-51.
WANG Zhenhua, WANG Liang. Development of aeroengine testing measurement technology[J]. Aeroengine, 2014, 40(6): 47-51.
- [3] 曹正威, 尹玉刚, 许姣, 等. 4H-SiC MEMS 高温电容式压力敏感元件设计[J]. 纳米技术与精密工程, 2015, 13(3): 179-180.
CAO Zhengwei, YIN Yugang, XU Jiao, et al. Design of MEMS high-temperature capacitance pressure sensor based on 4H-SiC[J]. Nanotechnology and Precision Engineering, 2015, 13(3): 179-180.
- [4] 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): 61-62.
- HE Wentao, LI Yanhua, ZOU Jiangbo, et al. Present research status and prospective trend of high-temperature pressure sensor[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2016, 37(6): 61-62.
- [5] 周剑, 候占强, 肖定邦. 极端环境下压力传感器的研究进展[J]. 国防科技, 2015, 36(4): 15-19.
- ZHOU Jian, HOU Zhanqiang, XIAO Dingbang. Review on pressure sensor in harsh environment[J]. National Defense Science and Technology, 2015, 36(4): 15-19.
- [6] 庞天照, 严子林, 唐飞. 等. 碳化硅高温压力传感器的研究进展与展望[J]. 噪声与振动控制, 2010(1): 170-171.
- PANG Tianzhao, YAN Zilin, TANG Fei, et al. Recent development and future perspective of silicon carbide high-temperature pressure sensor[J]. Noise and Vibration Control, 2010(1): 170-171.
- [7] 张晓丽, 陈水金. 耐高温压力传感器研究现状与发展[J]. 传感器与微系统, 2011, 30(2): 1-2.
- ZHANG Xiaoli, CHEN Shuijin. Research status and progress of high-temperature pressure sensor[J]. Transducer and Microsystem Technology, 2011, 30(2): 1-2.
- [8] BARLIAN A A, PARK W T, MALLON J R, et al. Review: semiconductor piezoresistance for microsystems[J]. Proceedings of the IEEE Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2009, 97(3): 513-552.
- [9] 孙以材, 刘玉玲, 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: 293-304.
- [10] 李瑜, 刘志远, 王晓光. 等. 高频响应耐高温MEMS压力传感器封装工艺研究[J]. 传感器与微系统, 2021, 40(5): 64-65.
- LI Yu, LIU Zhiyuan, WANG Xiaoguang, et al. Research on packaging technology of high frequency response and high temperature MEMS pressure sensor[J]. Transducer and Microsystem Technology, 2021, 40(5): 64-65.
- [11] 李村, 杨鑫婉, 赵玉龙, 等. 适用于无引线封装的SOI压力敏感芯片总体结构[J]. 中国测试, 2020, 46(12): 55-56.
- LI Cun, YANG Xinwan, ZHAO Yulong, et al. SOI pressure sensor chip suitable for leadless package[J]. China Measurement and Test, 2020, 46(12): 55-56.
- [12] 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): 5.
- TIAN Lei, YIN Yanzhao, MIAO Xin, et al. Leadless packaging high-temperature pressure sensor[J]. Semiconductor Technology, 2014, 39(12): 5.
- [13] 金忠, 谢贵久, 颜志红, 等. 一种硅压力传感器无引线封装结构. CN202836865U[P]. (2013.03.27).
- [14] 李俊龙, 朱平. 无引线封装的SOI压阻式压力传感器设计[J]. 仪器仪表与传感器, 2017(12): 21-22.
- LI Junlong, ZHU Ping. Design of leadless packaging SOI piezoresistive pressure sensor[J]. Instrument Technique and Sensor, 2017(12): 21-22.
- [15] 李海博. 硅微传感器耐高温技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012.
- [16] 单存良, 梁庭, 王文涛, 等. 基于SOI的MEMS高温压阻式压力传感器[J]. 微纳电子技术, 2021, 58(4): 329-330.
- SHAN Cunliang, LIANG Ting, WANG Wentao, et al. MEMS high temperature piezoresistive pressure sensor based on SOI[J]. Micronanoelectronic Technology, 2021, 58(4): 329-330.
- [17] 蒋本雨. 有关压力传感器可靠性设计的若干问题[J]. 遥测遥控, 1998, 19(4): 52-55.
- JIANG Benyu. Some problems about design of pressure sensor[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 1998, 19(4): 52-55.
- [18] 李科杰. 新编传感器手册[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002: 488-509.
- [19] 孟立凡, 郑宾. 传感器原理及技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2005: 118-129.
- [20] 吴沛珊. 高温压力传感器封装结构的研究与设计[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2021.
- [21] KURTZ A D, NED A A, EPSTEIN A H. Ultra high temperature, Miniature, SOI sensor for extreme environment [C]//IMAPS International HiTEC, Santa Fe, New Mexico, 2004: 1-11.
- [22] GUO S W, ERIKSEN H, CHILDRESS K, et al. High temperature smart-cut SOI pressure sensor[J]. Sensor and Actuators A: Physical, 2009, 154: 255-260.
- [23] GIULIANIA A, DRERAA L, ARANCIOA D, et al. SOI-based, High reliable pressure sensor with floating concept for high temperature applications[J]. Procedia Engineering, 2014, 87: 720-723.
- [24] 赵德强, 马立斌, 杨君. 银粉及电子浆料产品的现状及趋势[J]. 电子元件与材料, 2005, 24(6): 54-56.
- ZHAO Deqiang, MA Libin, YANG Jun. Resent situation and development trends of silver power and electronic paste[J]. Electronic Components & Materials, 2005, 24(6): 54-56.

[作者简介]

- 许姣 1987年生, 硕士, 高级工程师。
赵晨曦 1996年生, 硕士, 助理工程师。
杨健 1988年生, 博士, 工程师。
郝文昌 1989年生, 博士, 工程师。
王建 1982年生, 博士, 研究员。
尹玉刚 1982年生, 硕士, 研究员。

(本文编辑: 潘三英)