

文章编号: 1671-7449(2025)01-0027-06

封装黏合材料对高温压力传感器性能影响研究

罗后明¹, 雷程^{1*}, 李锐锐¹, 张姝², 赵佳龙¹, 肖楚译¹, 王旦旦¹

(1. 中北大学微纳器件与系统教育部重点实验室, 山西太原 030051; 2. 天津津航技术物理研究所, 天津 300308)

摘要: SOI(Silicon-on-Insulator)高温压力传感器的封装结构是影响其在高温环境下稳定工作的重要因素, 基于SOI基芯片分别采用无机高温胶、环氧树脂、玻璃浆料作为封装黏合材料, 每种材料各制备3支高温压力传感器, 经过300 °C@100 h带电考核实验。结果显示, 无机高温胶、环氧树脂、玻璃浆料作为封装黏合材料制备的高温压力传感器在300 °C@100 h内平均零点输出时漂分别约为0.019 05、1.649 65、0.066 93 mV/h, 其平均综合重复性、迟滞性、线性度分别约为1.062%、4.932%和1.857%。实验结果表明封装黏合材料热膨胀系数越小, 在高温环境下对传感器输出性能影响越小。

关键词: SOI高温压力传感器; 封装黏合材料; 热膨胀系数

中图分类号: TP212

文献标识码: A

doi: 10.62756/csjs.1671-7449.2025005

引用格式: 罗后明, 雷程, 李锐锐, 等. 封装黏合材料对高温压力传感器性能影响研究[J]. 测试技术学报, 2025, 39(1): 27-32.

LUO Houming, LEI Cheng, LI Ruirui, et al. Effect study of encapsulating adhesive materials on the performance of high-temperature pressure sensors[J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2025, 39(1): 27-32.

Effect Study of Encapsulating Adhesive Materials on the Performance of High-Temperature Pressure Sensors

LUO Houming¹, LEI Cheng^{1*}, LI Ruirui¹, ZHANG Shu², ZHAO Jialong¹,
XIAO Chuyi¹, WANG Dandan¹

(1. Key Laboratory of Micro/Nano Devices and Systems, Ministry of Education,
North University of China, Taiyuan 030051, China;

2. Tianjin Jinhang Institute of Technical Physics, Tianjin 300308, China)

Abstract: The packaging structure of SOI high-temperature pressure sensors is an important factor affecting its stable operation in high-temperature environments. In this paper, based on an SOI chip, inorganic high-temperature adhesive, epoxy resin and glass paste were used as packaging and bonding materials, and three high-temperature pressure sensors were prepared from each material. After a 300 °C@100 h online test, the results showed that the average zero output drift of the high-temperature pressure sensor prepared by inorganic high-temperature adhesive, epoxy resin and glass paste was about 0.019 05, 1.649 65 and 0.066 93 mV/h, within 300 °C@100 h, respectively. The average integrated repeatability, hysteresis and linearity were 1.062%, 4.932% and 1.857%, respectively. The experimental results show that the smaller the coefficient of thermal expansion, the smaller the influence on the output performance of the sensor at high temperatures.

收稿日期: 2024-07-22

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2023YFB3208500); 中央引导地方科技发展资金项目(YDZJXSX20231B006)

作者简介: 罗后明(1999-), 男, 硕士生, 主要从事MEMS高温压力传感器研究。E-mail: luol84201@163.com。

*通信作者: 雷程(1987-), 男, 高级实验师, 博士, 主要从事微纳红外传感、微纳压力传感及微纳器件制造与系统集成研究。E-mail: leicheng@nuc.edu.cn。

Key words: SOI high-temperature pressure sensor; encapsulation bonding material; coefficient of thermal expansion

0 引言

高温压力传感器在航空航天^[1]、军事国防^[2]、能源化工^[8]等领域广泛应用。随着半导体技术与MEMS技术的快速发展^[4]，基于MEMS技术的高温压力传感器在军事和民用领域的高温压力测量中发挥着巨大作用^[5]。虽然以碳化硅^[6]、金刚石^[7]和蓝宝石^[8]为衬底的压力传感器已被证明在300℃以上的高温环境下应用是可行的，但它们在高温环境下的测量精度和灵敏度不高^[9]，且成本巨大^[10]。

其中，SOI(Silicon-on-Insulator)基压阻式压力传感器凭借其材料结构本身的介质隔离方法、成熟的MEMS加工工艺手段、较低的工艺加工成本和和在高温环境下展现的优异性能，占据了较大的高温压力传感器市场份额^[11]。

封装结构是影响高温压力传感器性能的重要因素^[12]，而不同的封装黏合材料会影响传感器在高温环境下的使用^[13]。因此，本文从制备完成的SOI基高温压力芯片出发，分别采用无机高温胶、环氧树脂、玻璃浆料作为封装黏合材料将压力敏感芯片与耐高温基座烧结固定，之后采用金引线键合方法制备出完整的高温压力传感器^[14]，通过对高温压力传感器进行300℃@100h高温考核实验以及常温标定测试，得出不同封装黏合材料对传感器输出性能的影响^[15]。

1 传感器工作原理及结构分析

压阻式压力传感器基于压阻效应，将多个经过掺杂或离子注入工艺后的电阻排布在敏感膜的应力集中区，并经由金属引线连接成惠斯通电桥，如图1所示。无外部载荷作用时，敏感结构不发生形变，压敏电阻阻值不变，电桥处于平衡状态，无电压输出；当敏感结构受到外部载荷作用时，结构应力分布发生变化，应力的变化导致电桥不平衡，从而输出电压信号，完成力学量信号到电学量信号的转换^[14]。图1中的 U_{in} 为电桥输入电压， U_{out} 为电桥输出电压， $R_1 \sim R_4$ 为压敏电阻， $\Delta R_1 \sim \Delta R_4$ 为压敏电阻的改变量，根据其受力情况其值为正数或负数。传感器的输出电压表达式为

$$U_{out} = \frac{U_{in}}{4} \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} - \frac{\Delta R_3}{R_3} + \frac{\Delta R_4}{R_4} \right) \quad (1)$$

SOI高温压力传感器的封装结构如图2所示。

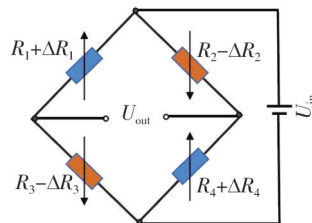


图1 惠斯通电桥

Fig. 1 Wheatstone bridge

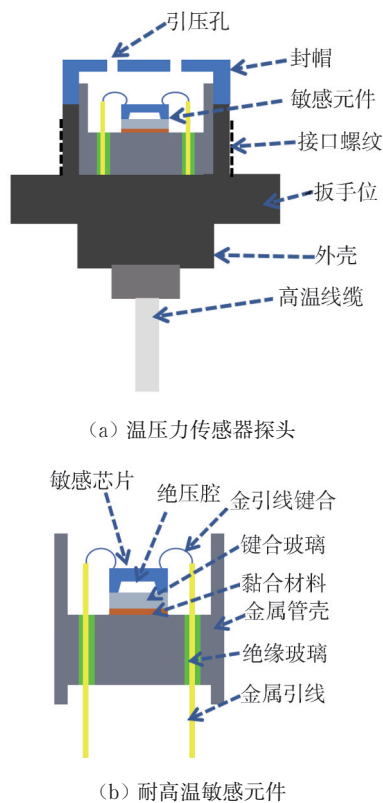


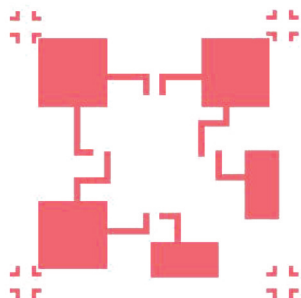
图2 高温压力传感器结构示意图

Fig. 2 High temperature pressure sensor structure schematic

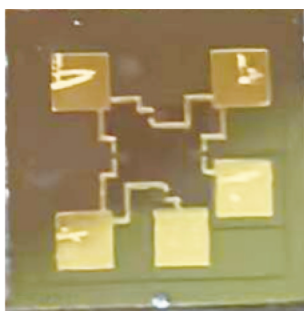
整体封装结构如图2(a)所示，耐高温敏感元件如图2(b)所示。其中最重要的部分为耐高温敏感元件，它是用封装黏合材料将高温压力敏感芯片与耐高温基座烧结制成的^[16]。采用金引线键合方法将高温压力敏感芯片焊盘上的电信号引至耐高温基座的接线柱上^[17]。

2 敏感芯片及管座制备

高温压力传感器敏感芯片基用SOI材料制备,采用深硅浅刻蚀制备电阻条^[18];通过溅射-剥离工艺制备金属引线,后续采用退火工艺形成欧姆接触^[19];通过深硅刻蚀完成背腔刻蚀;最后采用阳极键合技术将SOI晶圆片与BF33玻璃片键合,形成绝压参考腔^[20]。划片完成的芯片如图3所示。



(a) 五焊盘芯片示意图



(b) 五焊盘芯片实物图

图3 高温压力传感器敏感芯片

Fig. 3 Sensitive chip for high temperature pressure sensor

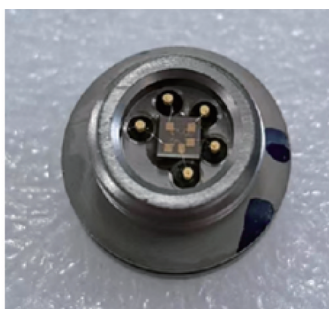


图4 耐高温敏感元件

Fig. 4 High-temperature-resistant sensitive element

耐高温管座采用304不锈钢管壳、绝缘玻璃、可伐合金引线制作而成。为方便后续金引线键合,可伐合金引线需要镀金处理。通过封装黏合材料把压力敏感芯片与耐高温基座烧结固定,最后采用金引线键合技术,将压力敏感芯片焊盘上的电信号引至耐高温基座接线柱上。如图4所示为耐高温敏感元件实物图。

3 封装黏合材料对敏感芯片应力影响

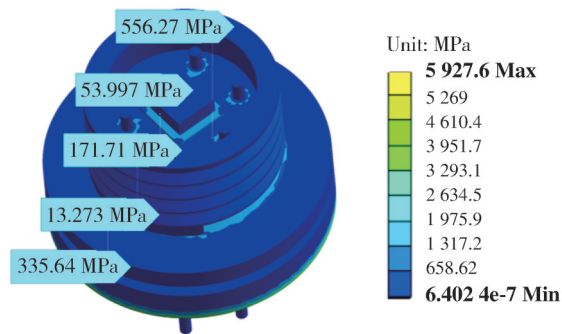
在传感器封装中,黏合材料与芯片直接接触,不同的黏合材料可能会对传感器输出造成较大影响,因此,分别选用无机高温胶、环氧树脂、玻璃浆料3种封装黏合材料,每种材料分别制备3个传感器开展研究。3种封装黏合材料参数如表1所示。

表1 封装黏合材料参数

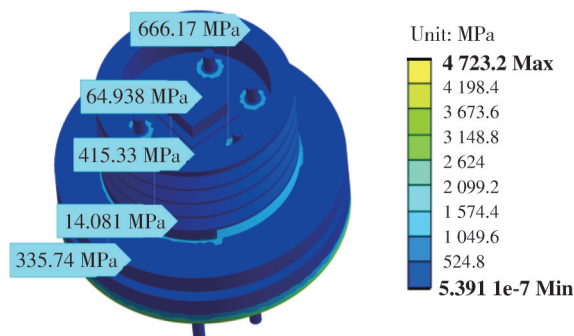
Tab. 1 Parameters of encapsulation adhesive material

材料	密度 ρ / ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	弹性模量 E / GPa	泊松比 μ	热膨胀系数CTE/ (10^{-6} K^{-1})
高温胶	2 740	340.0	0.200	5~8
环氧树脂	1 900	24.6	0.136	50~70
玻璃浆料	2 600	73.0	0.220	7~10

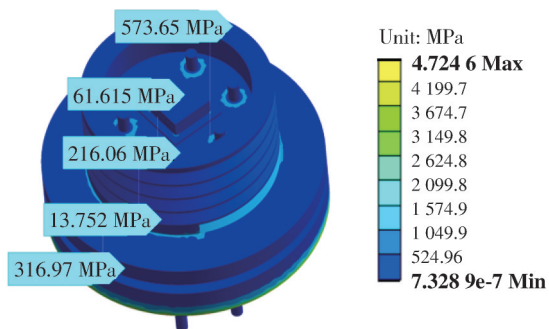
图5为不同黏合材料模型在300℃下的应力分布云图。从图5仿真结果可以得出:无机高温胶、环氧树脂和玻璃浆料作为黏合材料层处的应力分别为171.71、415.33和216.06 MPa,仿真结果表明无机高温胶的热膨胀系数相对较小,黏合材料的热膨胀系数越小,引入到芯片敏感膜片上的残余热应力也越小。



(a) 无机高温胶作为黏合材料应力分布



(b) 环氧树脂作为黏合材料应力分布



(c) 玻璃浆料作为黏合材料应力分布

图5 不同黏合材料应力分布

Fig. 5 Stress distribution of different adhesive materials

4 实验测试

为验证不同封装黏合材料在高温环境下对传感器输出性能的影响,现选取同一晶圆上电阻值相近的9颗芯片,每种封装黏合材料各制备3支传感器,随后搭建高温考核系统。将9支传感器同时放入高温烘箱进行300℃@100h带电考核。采用可编程直流稳压电源对传感器提供5V输入电压,利用高精度数据采集卡完成电学输出信号的监测。高温考核系统如图6所示。



图6 高温考核系统

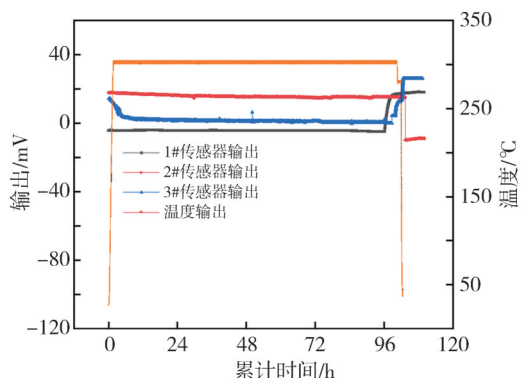
Fig. 6 High temperature examination system

300℃@100h带电考核数据如图7所示。

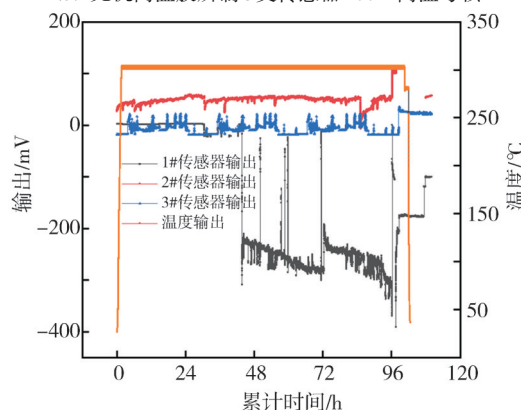
由图7高温考核数据可得:由无机高温胶作为封装黏合材料制作的3支传感器在300℃@100h考核时间里零点输出时漂分别为0.007 49, 0.022 01, 0.027 65 mV/h,平均时漂约为0.019 05 mV/h;由环氧树脂作为封装黏合材料制作的3支传感器在300℃@100h考核时间里零点输出时漂分别为3.663 29, 0.885 04, 0.400 61 mV/h,平均时漂约为1.649 65 mV/h;由玻璃浆料作为封装黏合材料制作的3支传感器在300℃@100h考核时间里零点输出时漂分别为0.033 74, 0.094 52, 0.072 52 mV/h,平均时漂约为0.066 93 mV/h。

实验数据表明,无机高温胶作为封装黏合材料所制备的高温压力传感器在300℃@100h里零

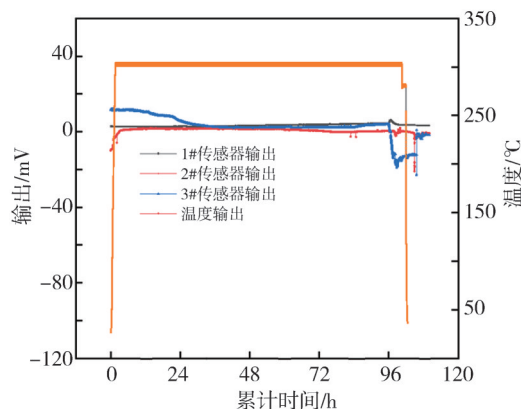
点输出时漂最小。



(a) 无机高温胶所制3支传感器100 h高温考核



(b) 环氧树脂所制3支传感器100 h高温考核



(c) 玻璃浆料所制3支传感器100 h高温考核

图7 不同黏合材料带电高温考核数据

Fig. 7 High-temperature test data of different adhesive materials with electricity

为进一步验证不同封装黏合材料对传感器性能的影响,搭建常温静态压力测试平台,利用康斯特台式气压泵设备,分别对高温考核后的3种封装黏合材料制成的9支传感器进行常温静态压力测试。测试平台如图8所示。

常温标定条件:利用可编程直流稳压电源为传感器提供5V电压输入,采用台式气压泵为传感器提供0~1 MPa压力输入载荷,设置步长为

0.2 MPa, 共 6 个测试点, 测试过程中采用高精度万用表采集传感器输出信号。图 9(a)~图 9(c)所示分别为 3 种不同封装黏合材料制成的 9 支传感器在常温状态下的压力-输出曲线。

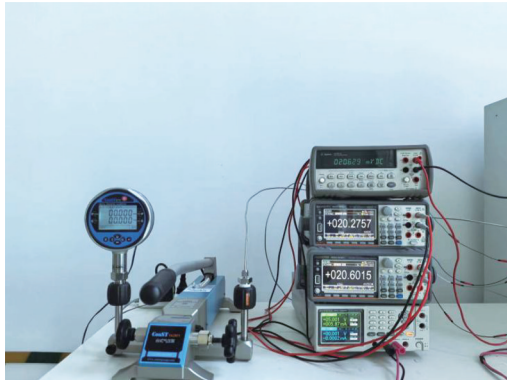


图 8 常温静态压力测试平台

Fig. 8 Static pressure test platform at room temperature

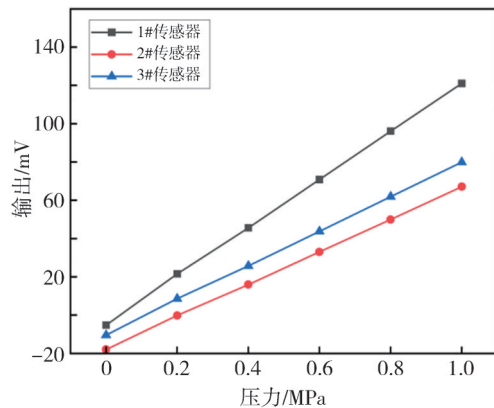
由图 9 可知各传感器线性度良好, 根据国家计量检定规程《JJG860—2015 压力传感器静态》^[21]对所测数据进行处理, 如表 2 所示。

表 2 不同封装黏合材料所制传感器静态性能指标

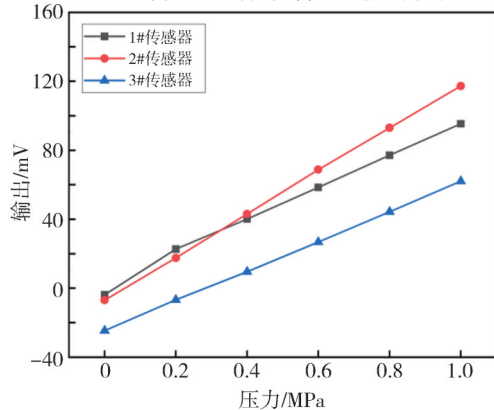
Tab. 2 Static performance index of sensors made of different encapsulating adhesive materials

材料	重复性/%	迟滞性/%	线性度/%	综合重复性、
				迟滞性、 线性度/%
无机高温胶	0.38	0.72	0.66	1.048
	0.29	0.85	0.64	1.103
	0.29	0.63	0.77	1.036
环氧树脂	6.33	0.94	1.78	6.642
	4.95	1.32	0.68	5.168
	2.48	1.48	0.76	2.986
玻璃浆料	1.26	1.08	0.70	1.801
	1.52	0.68	0.27	1.687
	1.39	1.37	0.73	2.084

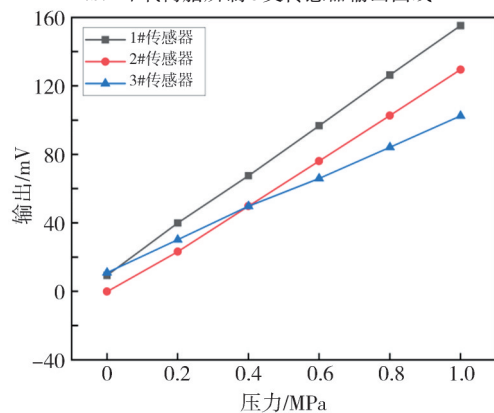
从表 2 中数据可得, 无机高温胶作为封装黏合材料所制的 3 支传感器综合重复性、迟滞性、线性度分别为 1.048%、1.103%、1.036%, 3 支传感器平均综合三性约为 1.062%; 玻璃浆料作为封装黏合材料所制的 3 支传感器综合重复性、迟滞性、线性度分别为 1.801%、1.687%、2.084%, 3 支传感器平均综合三性约为 1.857%; 环氧树脂作为封装黏合材料所制的 3 支传感器综合重复性、迟滞性、线性度分别为 6.642%、5.168%、2.986%, 3 支传感器平均综合三性约为 4.932%。由测试结果表明, 无机高温胶作为封装黏合材料所制高温压力传感器的静态性能更加优异。



(a) 无机高温胶所制 3 支传感器输出曲线



(b) 环氧树脂所制 3 支传感器输出曲线



(c) 玻璃浆料所制 3 支传感器输出曲线

图 9 传感器在常温状态下压力输出曲线

Fig. 9 Pressure output curve of the sensor at room temperature

5 结论

高温压力传感器在制备过程中, 敏感芯片和金属基座之间采用封装黏合材料封接, 敏感芯片的周围存在着较大的应力, 即使经过退火处理, 应力也不能完全消除。当温度发生变化时, 由于金属基座、封装黏合材料和敏感芯片热膨胀系数的不同, 会产生热应力, 使传感器的零点发生漂移影响传感器的输出性能。

本文基于SOI高温压力传感器芯片,设计并制作了3种不同封装黏合材料的9支压力传感器,在300 °C@100 h高温长时间带电考核测试结果表明,相比于环氧树脂和玻璃浆料,无机高温胶作为封装黏合材料制成的3支高温压力传感器在300 °C@100 h高温环境下平均零点输出时漂更小,约为0.019 05 mV/h。并且传感器在高温考核过后测试其静态性能指标结果表明,由无机高温胶作为封装黏合材料制成的3支传感器平均综合重复性、迟滞性、线性度约为1.062%,性能较其他两种材料更加优异,说明封装黏合材料的热膨胀系数越小,在高温环境下对传感器输出性能影响越小。

参考文献:

- [1] 刘海年,王相平,陈艳丽,等. 航空发动机基础要素建设方法研究[J]. 航空动力, 2022(4): 49-52.
LIU Hainian, WANG Xiangping, CHEN Yanli, et al. Research on the construction method of aero-engine basic elements[J]. Aviation Power, 2022(4): 49-52. (in Chinese)
- [2] JAVED Y, MANSOOR M, ALI SHAH I. A review of principles of MEMS pressure sensing with its aerospace applications[J]. Sensor Review, 2019, 39(5): 652-664.
- [3] 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.
HE Wentao, LI Yanhua, ZOU Jiangbo, et al. Research status and development trend of high temperature pressure sensor[J]. Telemetry Remote Control, 2016, 37(6): 61-71. (in Chinese)
- [4] 武晓慧,张慧毅,耿文平,等. 压电MEMS振动传感器调理电路设计与实现[J]. 测试技术学报, 2024, 38(3): 330-336.
WU Xiaohui, ZHANG Huiyi, GENG Wenping, et al. Design and implementation of conditioning circuit for piezoelectric MEMS vibration sensor [J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2024, 38(3): 330-336. (in Chinese)
- [5] 赵志强. 基于MEMS技术的高温压力传感器研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2023.
- [6] LE H, LI C, WANG L, et al. Design and fabrication of a high-temperature SOI pressure sensor with optimized crossbeam membrane[J]. Micromachines, 2023, 14(5): 1045.
- [7] KANEKAL D, JINDAL S K. Investigation of MEMS piezoresistive pressure sensor with a freely supported Rectangular silicon carbide diaphragm as a primary sensing element for altitudinal applications [J]. Silicon, 2023, 15: 1947-1959.
- [8] SALVATORI S, PETTINATO S, PICCARDI A, et al. Thin diamond film on silicon substrates for pressure sensor fabrication[J]. Materials, 2020, 13: 3697.
- [9] SHANG H, TIAN B, WANG D, et al. Development of All-SiC absolute pressure sensor based on sealed cavity structure [J]. IEEE Sensors Journal, 2021, 21(24): 27308-27314.
- [10] SHAO Z, WU Y, WANG S, et al. All-sapphire fiber-optic pressure sensors for extreme harsh environments[J]. Optics Express, 2022, 30(3): 3665.
- [11] YI J. Sapphire fabry-perot pressure sensor at high temperature [J]. IEEE Sensors Journal, 2021, 21(2): 1596-1602.
- [12] SHEEPARAMATTI B G, BALAVALAD K B. Fabrication and characterization of polysilicon-on-insulator (PolySOI) and a-SOI based micro piezoresistive pressure sensor for harsh environment applications[J]. Microsystem Technologies, 2019, 25(11): 4119-4133.
- [13] DÖRFLER A, FEIERTAG G, SCHMIDT M, et al. Numerical optimization of thermally induced hysteresis effects in the packaging of MEMS pressure sensors[J]. IEEE Sensors Journal, 2019, 19(10): 3633-3639.
- [14] 党伟刚,田学东,雷程,等. 封装黏合层材料对碳化硅高温压力传感器性能的影响 [J]. 半导体技术, 2023, 48(12): 1121-1128.
DANG Weigang, TIAN Xuedong, LEI Cheng, et al. Influence of packaging adhesive layer materials on the performances of SiC high temperature pressure sensors [J]. Semiconductor Technology, 2023, 48(12): 1121-1128. (in Chinese)
- [15] 梁庭,薛胜方,雷程,等. 高频响MEMS压力传感器设计与制备[J]. 仪表技术与传感器, 2021(6): 6-10.
LIANG Ting, XUE Shengfang, LEI Cheng, et al. Design and preparation of high-frequency ringing MEMS pressure sensors[J]. Instrumentation Technology and Sensors, 2021(6): 6-10. (in Chinese)
- [16] 李瑜,刘志远,王晓光,等. 高频响耐高温MEMS压力传感器封装工艺研究[J]. 传感器与微系统, 2021, 40(5): 64-66.
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 Technologies, 2021, 40(5): 64-66. (in Chinese)

(下转第95页)