

# 基于共晶焊技术的高温压力传感器无引线封装技术研究

王宇峰<sup>1</sup>,王丙寅<sup>2</sup>,赵艳栋<sup>2</sup>,雷程<sup>1</sup>,梁庭<sup>1</sup>

1. 中北大学,微纳器件与系统教育部重点实验室;2. 内蒙古动力机械研究所

**摘要:**针对 MEMS 高温压力传感器在高温特种环境下存在引线电学失效的不可靠性因素,制备了基于共晶焊技术的无引线封装 SOI 高温压阻式压力传感器。利用金锗合金焊料共晶焊接技术完成芯片与陶瓷基板的焊盘之间的连接。推力测试结果表明:其焊接强度最大值可达 28.30 MPa,均值约为 26.47 MPa。完成 300 °C 环境下的老化后,其 300 °C 高温环境下零点漂移为 0.216%,时漂约为 7.64  $\mu\text{V}/\text{h}$ 。老化后常温静态压力测试线性度为 0.126%,迟滞为 0.136%,重复性为 0.197%,均小于 2‰,基本误差为 0.433%。研究结果验证了金锗焊料共晶焊接制备无引线封装压力传感器的技术路线可行性。

**关键词:**微机电系统(MEMS);共晶;无引线封装;高温压力传感器;二元合金

中图分类号:TP212 文献标识码:A

## Research on Leadless Packaging Technology of High Temperature Pressure Sensor Based on Eutectic Welding Technology

WANG Yufeng<sup>1</sup>, WANG Bingyin<sup>2</sup>, ZHAO Yandong<sup>2</sup>, LEI Cheng<sup>1</sup>, LIANG Ting<sup>1</sup>

1. North University of China, Key Laboratory of Micro/nano Devices and Systems, Ministry of Education;

2. Inner Mongolia Power Machinery Research Institute

**Abstract:** Aiming at the unreliability problem of MEMS high temperature pressure sensor with lead electrical failure in high temperature special environment, a leadless packaging SOI high temperature piezoresistive pressure sensor based on eutectic welding technology was fabricated. The metal and germanium alloy solder eutectic welding technology was used to connect the ceramic substrate and the chip pad. The thrust test results show that the maximum welding thrust strength can reach 28.30 MPa, and the average is about 26.47 MPa. After the high temperature aging work at 300 °C, the zero drift at 300 °C is 0.216%, and the time drift is about 7.64  $\mu\text{V}/\text{h}$ . After aging, the linearity of static pressure test at room temperature is 0.126%, the hysteresis is 0.136%, and the repeatability is 0.197%, all of which are less than two thousandths, and the basic error is 0.433%. The experimental results prove the feasibility of the technical route for fabricating leadless packaging pressure sensor by eutectic welding of gold-germanium solder.

**Keywords:** micro electronic mechanical system (MEMS); eutectic; leadless packaging; high temperature pressure sensor; binary alloy

## 0 引言

压力传感器广泛应用于能源化工、汽车、医疗<sup>[1]</sup>及航空航天<sup>[2]</sup>等现代产业中,伴随着半导体技术和 MEMS 技术的快速发展,基于 MEMS 技术的微型压力传感器在民用和军用领域的压力测量中发挥着重要作用。SOI 材料凭借其结构本身的介质隔离方法,以及成熟的硅基加工工艺手段,占据较大的高温压力传感器市场份额<sup>[3]</sup>。目前,在汽车发动机歧管、工业化

工反应釜和高温锅炉等特种环境下,存在着对极端环境中的压力参数测量需求<sup>[4]</sup>。

随着微纳尺度加工手段的发展,为适应高温测试需求, MEMS 高温压力传感器芯片设计方法不断迭代更新、芯片结构不断优化、封装手段也在持续进步。传统的引线键合技术,金丝暴露在测试环境中,承受压力介质带来的腐蚀、冲击和振动等影响,极易造成短路或者开路等问题<sup>[5]</sup>。共晶焊接是一种常用的低熔点焊接的微组装机方法,具备连接电阻小、焊接强度高优点。无引线封装方法利用合金焊料共晶键合、垂直互联技术等方法,取代引线键合,一定程度上优先避免封装引线直接暴露导致的封装失效问题<sup>[6]</sup>。本文设计了一款基于共晶焊技术的无引线封装 MEMS

**基金项目:**国家重点研发计划项目(2023YFB3209100);中央引导地方科技发展资金项目(YDZJSX20231B006);山西省重点研发计划项目(202102030201001,202102030201009);山西省科技重大专项计划“揭榜挂帅”项目(202201030201004)

收稿日期:2023-12-25

高温压力传感器,完成了高温环境下的测试,证明了共晶焊技术在无引线封装领域的可行性。

### 1 无引线封装压力传感器设计

无引线封装 MEMS 高温压力传感器压力敏感芯片结构主要由 SOI 与硼硅玻璃键合构成,如图 1 所示,利用阳极键合技术,将 SOI 器件层即传感器电学敏感元件,通过键和封在玻璃盲孔内,有效保护其不受到压力介质的冲击。并通过在阳极键合玻璃上制造玻璃通孔,利用磁控溅射技术,在通孔内部沉积金属层,将 SOI 器件层连接至阳极键合玻璃表面的 500  $\mu\text{m}$  金焊盘,实现对 SOI 器件层的电学信号传输工作。

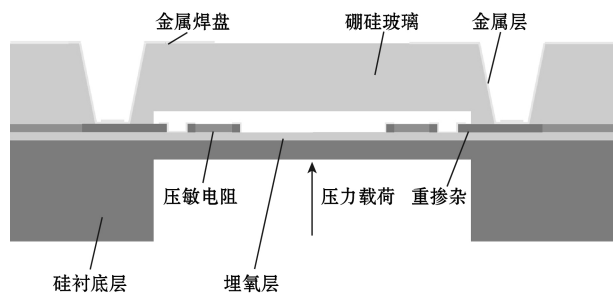


图 1 压力敏感芯片结构设计

压力敏感芯片工艺加工流程设计如图 2 所示,利用 4 英寸晶圆批量制备压力敏感芯片。

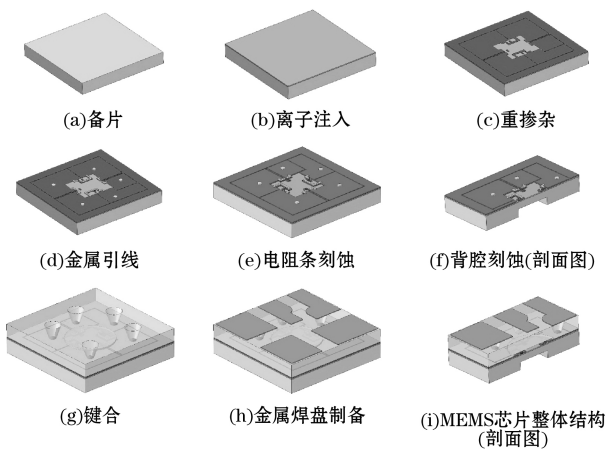


图 2 压力敏感芯片工艺加工流程

氮化铝的热膨胀系数约为  $4.5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ,硅材料的热膨胀系数约为  $3.5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ,两者相互适配,在高温环境中使用时,因热膨胀系数失配导致的封装热应力较小。除此之外,氮化铝材料的机械强度高、对金、铜等金属材料具备一定的耐溶蚀能力,因此选用氮化铝陶瓷材料所制备的 PCB 板作为封装基板。在陶瓷基板上通过电镀方式,在 30  $\mu\text{m}$  的铜种子层上电镀 50  $\mu\text{m}$  金,利用金属走线实现对芯片的接点位置的改变,使其适配于后端封装结构。

利用倒装封装方法(Flip-Chip)将压力敏感芯片与氮化铝封装芯片进行焊接,其倒装封装芯体结构如

图 3 所示,常规倒装芯片使用常见的锡球作为焊料,但是锡球无法使用于高于 220  $^{\circ}\text{C}$  的高温环境,因此倒装式无引线封装高温压力传感器需要一种耐高温焊料。

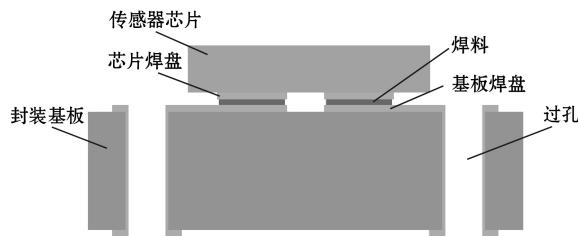


图 3 倒装封装芯体结构示意图

### 2 原理

共晶焊接技术又称为低熔点焊接技术,在微电子、微组装领域已经得到了广泛应用,与锡焊、导电胶等连接方式相比,共晶焊技术具备较高的热导率、较低的电阻、较高的机械强度等优点<sup>[7]</sup>。因此在本设计中使用共晶焊技术作为倒装芯片的电连接方法。

共晶焊接技术是基于共晶合金的特性原理实现焊接工艺的。共晶是指在相对较低的温度,此温度低于合金中任一组分单质熔点,在此温度下共晶焊料发生共晶物熔合,直接从固态转化为液态,不经过塑性变形阶段,其恒温转变特性使其在凝固过程中不会产生诸如偏聚、针孔等缺陷点<sup>[8]</sup>。

本研究设计的无引线封装高温压力传感器目标使用温度 300  $^{\circ}\text{C}$ ,以此温度指标对共晶合金进行筛选,即该合金的共晶温度不低于 300  $^{\circ}\text{C}$ 。为保证 300  $^{\circ}\text{C}$  环境下的可靠性,设计金属焊盘及金属引线金的复合金属层,因此还需要焊料对金具有良好的浸润性。

对图 4(金锆合金二元相图)进行分析,金锆合金符合上述指标需求。该合金电阻率低、熔化温度低,在锆组分原子量占比接近 28% 时,其共晶温度约为 361  $^{\circ}\text{C}$ ,低于此温度时,两组分固体几乎互不相融,高于此温度后,两者同时转化为液相并互溶。金锆合金对金焊盘具备良好的浸润性,并且具备一定的耐腐蚀性。且金锆合金中金组分占比较高,与芯片焊盘金属层极为接近<sup>[9]</sup>,因此通过扩散对金属层的浸溶程度较低。热膨胀系数约为  $13.4 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ,与硅材料较为接近。

### 3 实验

使用如图 5 所示的半自动微组装机实现倒装共晶焊接工艺。该设备通过高精度步进电机配合视觉系统,实现芯片的倒装对准及焊接工艺。为避免在焊料升温过程中被空气氧化,同时配套氮气氛围供给系统。

共晶焊接是利用在芯片与封装基板之间放置金锆合金薄片,其形状与芯片焊盘完全一致,面积略小

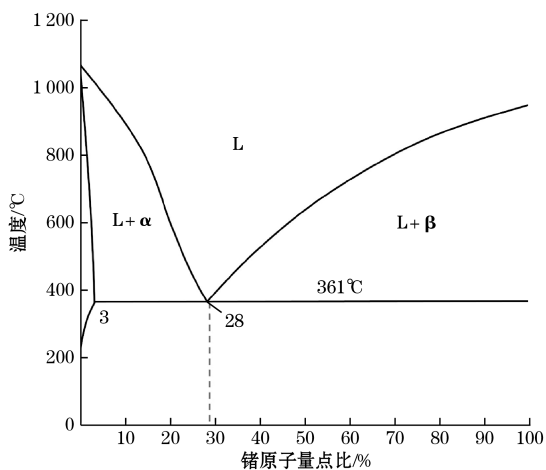
图4 金铜合金二元相图<sup>[10]</sup>

图5 半自动微组装机

于焊盘大小,厚度为  $40\ \mu\text{m}$ 。在氮气的保护下,加热至合金共熔点使其融化,在芯片与陶瓷基板的焊盘之间起到连接作用。同时,金铜合金焊料在焊接过程中,在温度和压力的作用下,合金中的金属原子会对芯片、封装基板的金焊盘产生微量扩散,冷却后形成合金焊料与两者金属层之间的原子间的结合,完成焊接工艺<sup>[11]</sup>。因此,在焊接前,需要利用超声等清洗工艺对芯片的焊盘做好清洗工作,从而避免在芯片、封装基板焊盘上的污染对焊料浸润性的影响,造成焊接过程中产生空洞、开裂等问题。

利用金铜合金焊料的金铜合金回流曲线如图6所示,开始工艺前通入氮气,并全程保持氮气氛围。在工艺的前1500 s完成预热,随后缓慢升温至  $360\ ^\circ\text{C}$ ,通过此过程完成对焊料吸附的水汽进行烘干,后升温至  $410\ ^\circ\text{C}$ ,在此阶段完成金铜合金焊料的融化并完成焊接,此时需要进行压力载荷的施加,通过微组装机在芯片表面施加  $1500\ \text{g}$  的载荷。随后温度降至  $360\ ^\circ\text{C}$ 后,撤销压力载荷,随后温度降至常温。

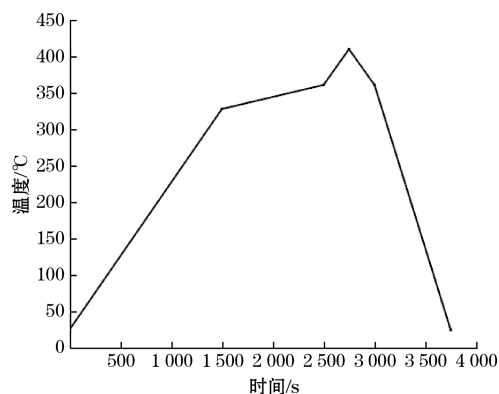


图6 金铜合金回流曲线图

焊接完成后的传感器封装芯体如图7所示,经初步测试,其阻值与焊接前相同,未发现异常。将其封装在航空接插件内,制成如图8所示的传感器样机,着手开始后续测试工作。

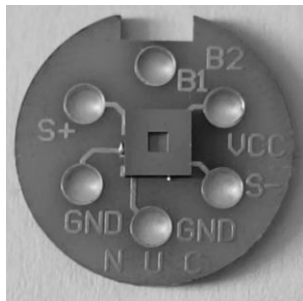


图7 焊接封装芯体成品



图8 传感器封装样机

#### 4 测试

利用台式气压泵对封装芯体进行常温静态压力测试,其测试数据如表1所示。

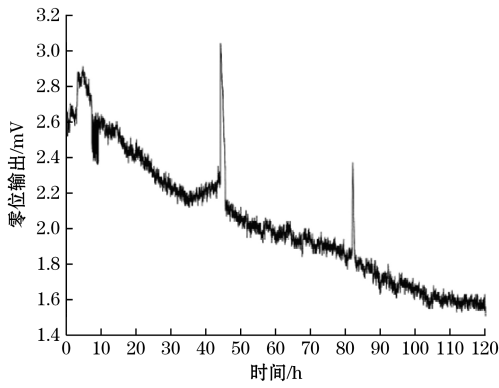
表1 传感器常温静态测试数据

标准 压力 /MPa	实际输出值/mV					
	第1次检定		第2次检定		第3次检定	
	正行程	反行程	正行程	反行程	正行程	反行程
0	-0.84	-1.10	-1.10	-1.17	-1.17	-1.20
3.75	16.97	16.84	16.76	16.76	16.73	16.71
7.50	34.61	34.54	34.56	34.57	34.56	34.56
11.25	52.35	52.30	52.27	52.31	52.33	52.34
15.00	70.05	70.05	70.03	70.03	70.01	70.01

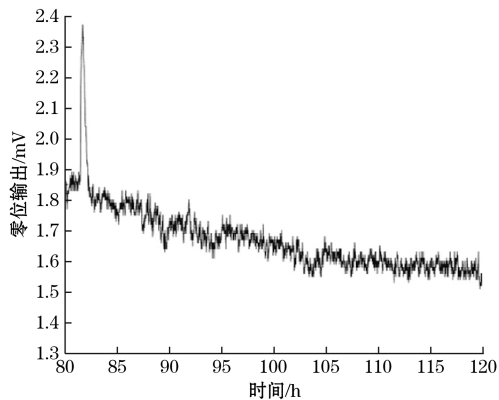
根据国家计量检定规程 JJG860-2015《压力传感器(静态)检定规程》<sup>[12]</sup>对测试数据进行处理。其常温灵敏度约为  $4.741\ \text{mV/MPa}$ ,线性度约为  $0.067\%$ ,迟滞约为  $0.127\%$ ,基本误差为  $0.321\%$ 。

利用高温烘箱对传感器进行高温带电老化,释放SOI、玻璃以及金属在工艺过程中引入的应力。老化条件为  $300\ ^\circ\text{C}$ 环境下保温100 h,其  $300\ ^\circ\text{C}$ 保温带电老化数据如图9(a)所示。其  $300\ ^\circ\text{C}$ 高温零位输出从

2.52 mV 经过 120 h 漂移至 1.53 mV。图 9(b) 数据显示直至 100 h 后传感器高温零位输出稳定。截取老化数据最后 40 h,其高温零位输出从 1.89 mV 漂移至 1.53 mV,100 h 稳定后,高温零位输出从 1.68 mV 漂移至 1.53 mV,300 °C 环境下零点漂移约为 0.216%,最终高温时漂约为 7.64  $\mu\text{V}/\text{h}$ 。



(a) 120 h 全部测试数据



(b) 后 40 h 测试数据

图 9 带电老化测试数据

老化后进行二次常温静态标定,测试数据如表 2 所示。传感器的重复性与迟滞均得到改善,重复性为 0.197%,相较于老化前改善了 38.82%;迟滞为 0.136%,相较于老化前改善了 19.53%;灵敏度为 4.721 mV/MPa,相较于老化前降低 0.42%;基本误差为 0.433%,相较于老化前变差 1.17%。

表 2 传感器常温静态测试数据

标准 压力 /MPa	实际输出值/mV					
	第 1 次检定		第 2 次检定		第 3 次检定	
	正行程	反行程	正行程	反行程	正行程	反行程
0	-2.33	-2.31	-2.31	-2.33	-2.33	-2.33
3.75	15.34	15.38	15.28	15.42	15.38	15.37
7.50	33.08	32.97	32.89	33.04	33.01	33.02
11.25	50.88	50.87	50.86	50.96	50.81	51.01
15.00	68.41	68.41	68.46	68.46	68.43	68.43

上述测试结果表明:金锆焊料的共晶焊技术,具备在 300 °C 环境下电学信号的传输功能以及机械结构连接的能力。

压力测试标定结束后,利用拉力计对其进行推力测试,拉力计通过设置会记录芯片与陶瓷基板之间断开的载荷的峰值,通过计算得到芯片与陶瓷基板之间共晶焊接的剪切强度。

合计进行了 3 支封装芯体的测试,测试数据如表 3 所示。强度最大值约为 28.30 MPa,平均强度约为 26.47 MPa。

表 3 焊接推力测试结果

序号	载荷/N	强度/MPa
1	58	26.48
2	54	24.64
3	62	28.30

被拉力计拉开的芯片如图 10 所示,观察断开的界面,呈现为芯片焊盘表面普遍存在焊料熔融物,即断裂是从陶瓷基板表面焊盘位置断开,压力敏感芯片金属焊盘部分位置脱落,因此判断共晶焊推力测试失效位置为焊料与陶瓷基板之间发生断裂。判断为陶瓷基板焊盘表面 50  $\mu\text{m}$  的金镀层相比于芯片的 500  $\mu\text{m}$  金焊盘较薄,在焊接过程中相对扩散程度较低,因此断裂的位置发生在陶瓷基板金焊盘位置。

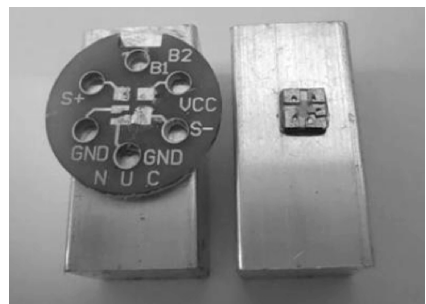


图 10 断开的封装基板与芯片

### 5 结论

测试结果表明:利用金锆合金焊料,通过共晶焊方法制成的无引线封装高温压力传感器在 120 h 的 300 °C 高温带电老化考核的过程中未发生失效,老化完成后的状态下高温时漂为 7.64  $\mu\text{V}/\text{h}$ 。根据相关国家测试规范进行考核,芯片能够完成对 15 MPa 压力传感器的测试工作,测试基本误差为 0.433%。对共晶焊接进行推力测试,其强度约为 26.47 MPa。工作证明:利用金锆焊料共晶焊的方式可以实现倒装式无引线封装高温压力传感器的制备。

(下转第 27 页)

微型电场传感器,首次将模态局域化原理应用在电荷感应式电场传感器上,通过利用模态局域化效应使传感器弱耦合谐振系统产生大的振幅比,并采用屏蔽盖板的形式以达到测试效果,从而提高电荷感应式传感器的灵敏度,被测量电场与传感器输出量为线性关系,减小了传感器的非线性误差。该传感器的灵敏度为 0.119 m/kV,线性度为 5.8%。

#### 参考文献:

- [1] KIRKHAM H. On the measurement of stationary electric fields in air[C/OL]//Conference Digest Conference on Precision Electromagnetic Measurements, 2003.
- [2] MONTANYA J, BERGAS J, HERMOSO B. Electric field measurements at ground level as a basis for lightning hazard warning[J]. Journal of Electrostatics, 2004, 60(2-4): 241-246.
- [3] PENG C, CHEN X, YE C, et al. Design and testing of a micro-mechanical resonant electrostatic field sensor[J]. Journal of Micromechanics and Microengineering, 2006, 16(5): 914-919.
- [4] YANG P, PENG C, ZHANG H, et al. A high sensitivity SOI electric-field sensor with novel comb-shaped microelectrodes[C]//2011 16th International Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems Conference, 2011: 1034-1037.
- [5] SPLETZER M, RAMAN A, WU A Q, et al. Ultrasensitive mass sensing using mode localization in coupled microcantilevers[J]. Applied Physics Letters, 2006, 88(25): 254102.

- [6] MONTASERI M H, XIE J, CHANG H, et al. Atmospheric pressure mode localization coupled resonators force sensor[C]//2015 Transducers - 2015 18th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems (TRANSDUCERS), 2015: 1183-1186.
- [7] ZHAO C, WOOD G, XIE J, et al. A sensor for stiffness change sensing based on three coupled resonators with enhanced sensitivity[C]//IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems. IEEE, 2015.
- [8] LIU X, WANG Z, WU Z, et al. Enhanced sensitivity and stability of a novel resonant MEMS electric field sensor based on closed-loop feedback[J]. IEEE Sensors Journal, 2021, 21(20): 22536-22543.
- [9] YANG P, PENG C, FANG D, et al. Design, fabrication and application of an SOI-based resonant electric field microsensor with coplanar comb-shaped electrodes[J]. Journal of Micromechanics & Microengineering, 2013, 23(23): 266-285.
- [10] 杨鹏飞. 谐振式共面电极微型电场传感器及其应用研究[D]. 北京:中国科学院大学, 2013.

**作者简介:**刘语斐(1999—), 硕士研究生, 主要研究领域为高灵敏 MEMS 电场传感器。

E-mail: liuyufei21@mails.ucas.ac.cn

彭春荣(1979—), 博士, 研究员, 主要研究方向传感器与微系统、微型电场传感器与系统、智能传感技术等。E-mail: crpeng@mail.ie.ac.cn

(上接第 21 页)

#### 参考文献:

- [1] SONG P, MA Z, MA J, et al. Recent progress of miniature MEMS pressure sensors. [J]. Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 2020, 11(1): 56-93.
- [2] JAVED Y, MANSOOR M, SHAH IA, et al. A review of principles of MEMS pressure sensing with its aerospace applications. [J]. Sensor Review, 2019, 39(5): 652-664.
- [3] SHEEPARAMATTI B G, BALAVALADKB. 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.
- [4] NONOMURA Y. Sensor technologies for automobiles and robots: sensor technologies [J]. IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering, 2020, 15(5): 984-994.
- [5] HAN X, HUANG M, WU Z, et al. Advances in high-performance MEMS pressure sensors: design, fabrication, and packaging. [J]. Microsystems & Nanoengineering, 2023, 156(9): 156-191.
- [6] 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): 54-59.

- [7] 庞婷, 王辉. 真空共晶焊接技术研究[J]. 电子工艺技术, 2017, 38(1): 8-11.
- [8] 鲁青, 邹军, 石明明, 等. 倒装 LED 芯片共晶焊接性能研究[J]. 应用技术学报, 2020, 20(4): 315-322.
- [9] 陈杰, 刘峰, 饶真真, 等. 微波功率器件中 AuGe 合金焊接界面特征[J]. 微纳电子技术, 2020, 57(1): 80-84.
- [10] LARSSON A, TOLLEFSEN T A, LOVVIK O M, et al. A review of eutectic Au-Ge Solder joints. [J]. Metallurgical and Materials Transactions a-physical Metallurgy and Materials Science, 2019, 50A(10): 4632-4641.
- [11] 余永宁. 金属学原理[M]. 北京:冶金工业出版社, 2000: 201-202.
- [12] 国家质量监督检验检疫总局. 中华人民共和国国家计量检定规程: 压力传感器(静态): JJG 860-2015[S]. 北京:中国质检出版社, 2015: 8-10.

**作者简介:**王宇峰(1998—), 硕士研究生, 主要研究方向为智能微型化高精度压力传感器。

E-mail: S202106093@st.nuc.edu.cn

**通信作者:**雷程(1987—), 高级实验师, 博士, 主要研究方向为微机电系统(MEMS)技术, 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相关的工作。E-mail: leicheng@nuc.edu.cn