

电池热失控监测用高精度 MEMS 压力传感器研究

王圣旗¹, 石 洲², 王久洪²

(1. 西安交通大学 机械工程学院, 陕西 西安 710049; 2. 西安交通大学 仪器科学与技术学院, 陕西 西安 710049)

摘要: 研制了一种用于锂离子电池热失控监测的高精度绝压型 MEMS 压力传感器。以 SOI 为基底, 提出了一种尺寸为 2.5×2.5 mm、膜片尺寸为 1.5×1.5 mm、膜片厚度 $40 \mu\text{m}$ 、量程为 50—250 kPa 的压力芯片方案, 研究了传感器芯片的力学特性、关键工艺、制备流程与性能测试。实验结果表明, 传感器在 -40 — 120 °C 温度区间的基本误差为 $\pm 0.2\%$ FS; 在 120 °C 温度点的热零点漂移为 -0.025% FS, 热灵敏度漂移为 -0.08% FS。过热和过充两种类型的电池热失控实验给出了压力、气溶胶、和电压信号在热失控发生时出现的特征规律。研究表明, 研制的 MEMS 压力传感器性能指标满足锂离子电池热失控预警的压力监测需求。

关键词: 电池热失控; MEMS; 压力传感器; 压敏芯片

中图分类号: TK312

文献标志码: A

文章编号: 2096-7772-(2025)02-0006-06

0 引言

随着新能源汽车在国内市场的快速崛起, 动力电池的安全性备受关注。车用动力电池为了追求高能量密度, 普遍采用锂离子电池, 如三元锂电池、磷酸铁锂电池等。由这类电池引起的热失控是新能源汽车安全事故的重要原因之一。电池热失控是指电池单体因为放热连锁反应引起的电池温度上升的不可控现象, 由电池包或电池单体热失控引发的电池单体接连热失控的现象被称为热扩散, 热失控主要由机械、电气和热滥用造成。电池单体在发生热失控之前, 会产生温度上升、内部压力增加、电压与电流异常等现象^[1]。电池热失控时电解液与正负极材料的化学反应会产生大量的气体和气溶胶, 当电池电芯内部压力超过防爆阈值时, 气体和气溶胶会扩散到电池箱内, 导致箱内气体压力、气溶胶浓度、气体组分等特征信号的变化。其中气体压力信号变化特征明显, 响应速度快, 与气溶胶和电池电压、电流及温度信号, 构成热失控判断的重要依据^[2]。

压力信号在三元锂电池热失控时的信号强度高

于磷酸铁锂类电池^[3]。一些厂商针对三元锂电池的热失控预警推出了专用的微机电系统 (Micro-Electro-Mechanical System, MEMS) 压力传感器。如 Honeywell 推出的 BPS 系列压力传感器的工作温区为 -40 — 105 °C, 量程为 50—300 kPa, 误差值为 $\pm 2\%$ FS, 传感器模组具有低功耗与唤醒模式, 提供了 CAN 通讯功能。荷兰恩智浦推出的 NBP 系列传感器的量程为 40—250 kPa, 压力芯片的尺寸为 4×4 mm, 工作温区为 -50 — 125 °C, 灵敏度为 0.206 kPa/LSB。国内纳芯微推出的热失控压力传感器 NSPAS1, 量程为 10—400 kPa, 在 -40 — 125 °C 范围内的精度为 $\pm 1.5\%$ FS。

在汽车领域高性能传感器竞争日益激烈的情况下, 新能源汽车电池热失控监测领域研发专用压力传感器的任务也十分迫切^[4]。分析电池热失控的压力传感器需求可知, 由于密闭电池箱配有 20—40 kPa 的压差防爆阀, 压力传感器的量程设计为 50—250 kPa 更为合理; 针对地域和季节温差, 传感器的工作温度应满足 -40 — 120 °C; 为了提升信号的准确性, 传感器芯片的精度应优于 0.5%。论文根据上述需求, 开展了一种动力电池热失控监测用高精度压力传感器的研究。

收稿日期: 2024-05-15

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2021YFB2012500); 陕西省重点研发计划项目 (2024GX-YBXM-192)

第一作者简介: 王圣旗 (1999—), 男, 吉林长春人, 在读硕士, 主要从事 EMMS 压力传感器研究。

通信作者简介: 王久洪 (1979—), 男, 辽宁锦州人, 满族, 研究员, 博士, 主要从事微型传感器技术研究。

1 SOI 压敏芯片

1.1 传感器理论与设计

单晶硅具有优秀的压阻效应和机械性能, 它的弹性模量为 130—190 GPa, 其中在 [100] 晶向上的弹性模量约为 169 GPa, 在 [110] 方向上的弹性模量约为 180 GPa, 材料的断裂强度约为 3 GPa^[5]。绝缘体上硅 (Silicon-On-Insulator, SOI) 材料的二氧化硅隔离层把原始硅片分成上下两部分, 上面的薄层硅用来制作器件, 下面的硅材料作为衬底。SiO₂ 隔离技术的应用, 避免了扩散硅工艺中的 PN 结高温漏电^[6], 提升了器件的耐高温性能。本文采用 (100) 晶面的 SOI 材料, 设计的芯片尺寸为 2.5 × 2.5 mm, 量程为 50—250 kPa, 版图示意结构如图 1 所示, 力敏膜片的承压区尺寸为 1.5 × 1.5 mm。

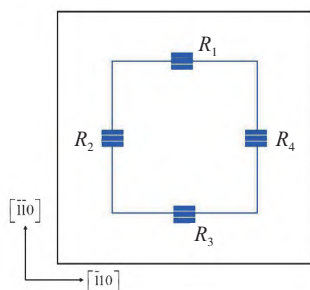


图 1 压力芯片版图示意图

当被测介质的压力 p 作用在力敏膜片的承压区时, 膜片会变形产生应力和应变。将压敏电阻布置在膜片边缘的应力集中处和灵敏度最大的晶向上, 可实现惠斯通全桥输出信号的最大化, 测量的电路原理如图 2 所示。电阻条 R_1 、 R_2 、 R_3 、 R_4 的有效长度均沿着 $[110]$ 或 $[1-10]$ 晶向, 充分利用了压阻系数来提高芯体的灵敏度。电阻设计为 4 折, 有效利用了纵向应力和横向应力差值的最大化来提高灵敏度。

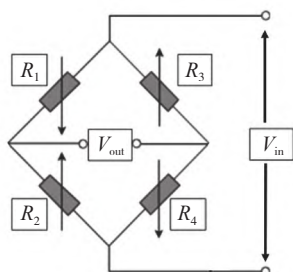


图 2 惠斯通全桥测量电路

膜片的形状为方形, 压敏电阻条的阻值变化率可由公式 (1) 计算^[7]:

$$\frac{\Delta R}{R} = \pi_l \sigma_l + \pi_t \sigma_t \quad (1)$$

式中: π_l 和 π_t 分别表示纵向和横向的压阻系数,

σ_l 和 σ_t 分别表示压敏电阻条处的纵向和横向应力。

电桥采用恒压供电形式, 电桥的输出电压 V_{out} 计算如公式 (2) 所示^[8]:

$$V_{out} = \frac{\Delta R}{R} V_{in} = \frac{1}{2} \pi_{44} (\sigma_l - \sigma_t) V_{in} \quad (2)$$

式中: π_{44} 为 p 型硅的剪切压阻系数分量, 是影响灵敏度的主要参数。 V_{in} 为供电电压, R 为压阻条的电阻值。

1.2 膜片的结构仿真与灵敏度优化

传感器的压敏芯片通常采用平膜结构, 如图 3 所示, 芯片与 BF33 玻璃通过键合形成绝压腔, 构成绝压芯片。为适应电池箱内 -40—120 °C 的温度需求, 通过重掺工艺降低了压敏电阻对温度的敏感性。传感器的灵敏度 S 的计算如公式 (3) 所示:

$$S = \frac{\Delta V_{out}}{\Delta P} \cdot \frac{1}{V_{in}} \quad (3)$$

式中: ΔV_{out} 为输出电压的变化量, ΔP 为压力变化量。当压力达到量程上限时, 输出变化量即为满量程输出。根据公式 (2) 可知, S 是由横纵向应力差和 π_{44} - p 型硅的剪切压阻系数分量决定的。由于 π_{44} 会随着掺杂剂量的增加而减小, 这种变化会降低传感器的满量程输出和灵敏度^[9]。为了协调传感器芯片温度特性和灵敏度之间的矛盾, 提出了如图 4 所示的岛膜方案, 即通过优化承压膜结构, 来提升灵敏度。



图 3 平膜结构示意图

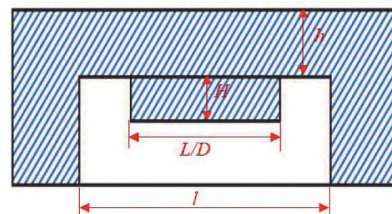


图 4 岛膜结构示意图

保持承压膜边长 l 不变, 岛膜上的岛结构用来增加膜片的刚度, 保证膜片在受到最大压力时的应力集中值不超过材料的破坏强度^[10]。影响器件灵敏度的岛膜参数有岛的长度 L , 岛的宽度 D , 岛的厚度 H 和膜的厚度 h , 其中膜厚和岛厚对灵敏度的影响较大, 岛长和岛宽次之。优化调节结构参数, 将横向与纵向压

阻条的应力均值调成一致，并保证弹性膜片的最大应力值小于材料破坏应力值的 20%，优化后的岛膜参数如表 1 所示。

表 1 关键参数设计结构

序号	参数指标	数值 / μm
1	膜边长 l	1500
2	岛的长度 L	1200
3	岛的宽度 D	1230
4	膜的厚度 h	20
5	岛的厚度 H	20

采用 COMSOL 软件对两种结构的芯片受力情况进行了仿真分析。如图 5(a) 和 (b) 所示，平膜的应力集中区分布宽、应力小，压敏电阻受到的应力均值小，因此灵敏度小；岛膜结构的最大应力值明显提升，应力集中区域狭窄，电阻条上的应力均匀，且应力值大。平膜结构中横向和纵向压阻条上的均值应力差分别为 54.89 MPa 和 54.99 MPa。当岛膜总厚度 ($40\text{ }\mu\text{m}$) 与平膜厚度一致的情况下，岛膜结构的应力曲线如图 6 所示。此时横向与纵向压阻条上的横纵向电阻均值应力差分别为 84.72 MPa 和 84.714 MPa，比平膜结构的应力均值提升了 54%，即灵敏度提升了 54%。

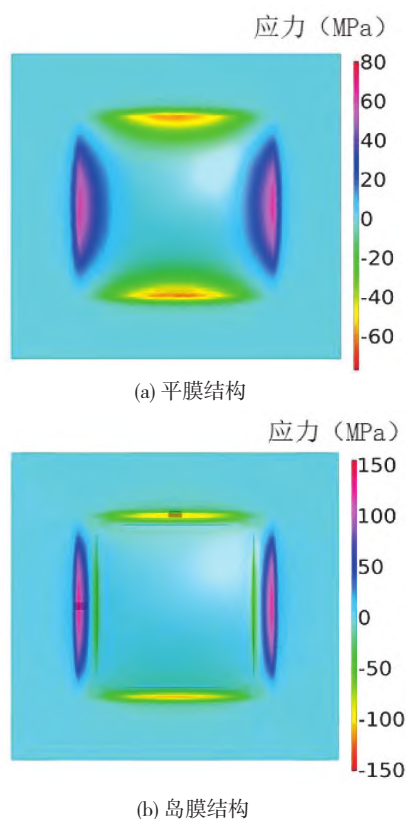


图 5 压敏芯片的应力分布

为保证压敏芯片的线性输出，在量程范围内，弹性膜片的最大挠度应小于膜厚的 20%。芯片的

COMSOL 挠度仿真结果如图 7 所示，其中心处的最大变形值为 $1.8\text{ }\mu\text{m}$ ，满足设计要求。

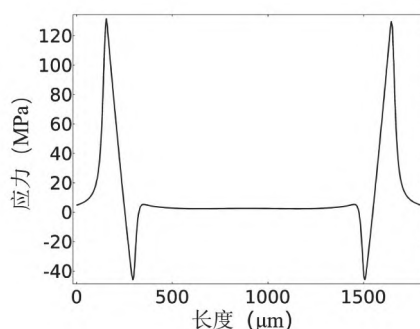


图 6 岛膜结构应力曲线图

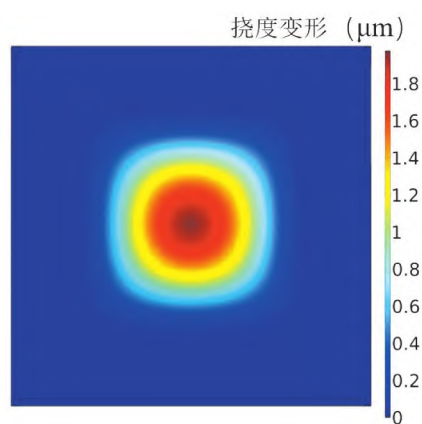


图 7 挠度云图

1.3 压敏芯片工艺制造

压敏芯片的主要制作流程如下：

(1) 基底材料采用 N 型 (100) 双面抛光的 SOI 晶圆，晶圆顶部为 500 nm 厚的 Si 层以及 400 nm 厚的 SiO_2 埋氧层。

(2) 在顶硅层，用高温热氧工艺制作 80 nm 厚的氧化硅层，以提高离子注入的均匀性^[11]。顶硅层注入并扩散 B^+ ，将注入剂量从 $3\text{e}15\text{ atoms/cm}^2$ 提升为 $5\text{e}15\text{ atoms/cm}^2$ 后，芯片的温度特性最佳。注入后的芯片在 $1000\text{ }^\circ\text{C}$ 的 N_2 下退火 40 min 完成离子激活。

(3) 采用离子束法在顶硅层刻蚀出 4 个浮雕电阻，4 个电阻均采用 4 折结构。压阻条有效长度为 $400\text{ }\mu\text{m}$ ，方块电阻为 $23\text{ }\Omega$ 。

(4) 样品在 $1000\text{ }^\circ\text{C}$ 下氧化 30 min，形成 SiO_2 绝缘层；再用低温化学气相沉积法在 SiO_2 层上沉积一层 Si_3N_4 ，形成应力匹配的钝化层。

(5) 用直流溅射制作 Ti-Pt-Au 引线层，以提升器件高温稳定性^[12]。通过引线将压敏电阻连接成半开环惠斯通全桥，芯片在 $400\text{ }^\circ\text{C}$ 的 N_2 环境中保持 30 min，形成欧姆接触。

(6) 将 BF33 玻璃与晶圆进行对准键合、划片, 得到圆片级芯片和单体芯片, 如图 8 所示。

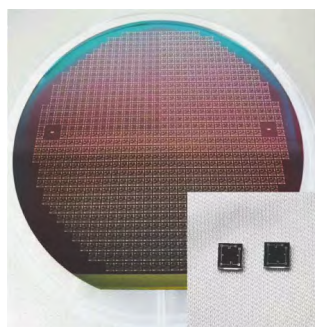


图 8 硅玻键合后的晶圆

2 传感器测试与模组开发

2.1 测试平台的搭建

搭建了传感器的测试标定平台, 系统如图 9 所示。平台中的计量器具为并行多通道压力数据采集装置和高精度数字压力控制器, 其中压力数据采集装置的不确定度为 $\pm (0.01\% \text{ rdg} + 1.5 \mu\text{V})$, 高精度数字压力控制器的准确度等级为 0.01 级。



图 9 传感器测试平台

2.2 压力传感器测试

测试依据 JJG 860—2015《压力传感器(静态)》开展, 传感器的供电电压为 5 VDC。对随机选取的两种类型的芯体进行了多温度点全量程测试, 结果如图 10 和图 11 所示。

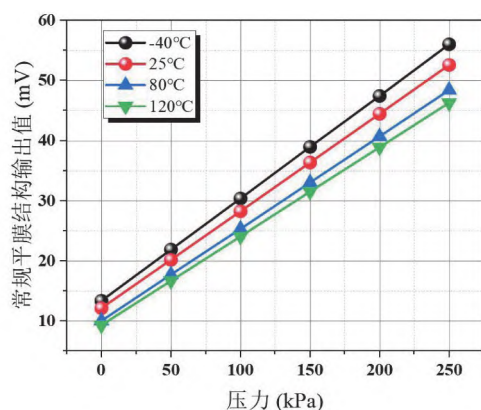


图 10 平膜结构传感器的全量程输出

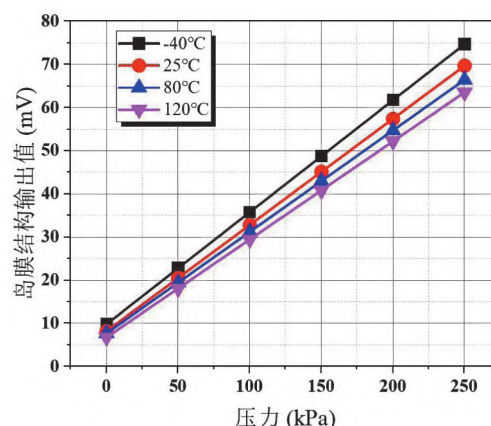


图 11 岛膜结构传感器的全量程输出

与平膜芯片相比, 岛膜芯片在不同温度点的全量程输出都增加了 50%—52%, 灵敏度由 $0.032 \text{ mV} \cdot (\text{kPa} \cdot \text{V})^{-1}$ 提升至 $0.048 \text{ mV} \cdot (\text{kPa} \cdot \text{V})^{-1}$, 与仿真结果相符。当工作温度从 25 °C 上升至 120 °C 时, 未经注入工艺优化的平膜芯片的零点变化量约为 4 mV, 经过工艺优化的岛膜芯片的零点变化量小于 2 mV。岛膜结构传感器芯片的常温测量误差为 0.2%, 精度较高, 在工作温度为 120 °C 时, 传感器的灵敏度温度漂移系数为 $-0.08\% \text{ FS}/^\circ\text{C}$, 热零点漂移系数为 $-0.025\% \text{ FS}/^\circ\text{C}$ 。

表 2 岛膜传感器芯体测试的各项性能指标

序号	参数指标	数值
1	常温精度误差	0.2%
2	非线性 γ_L	0.05%
3	重复性 γ_H	0.05%
4	迟滞 γ_R	0.13%
5	120 °C 零点温度漂移	$-0.025\% \text{ FS}/^\circ\text{C}$
6	120 °C 灵敏度温度漂移	$-0.080\% \text{ FS}/^\circ\text{C}$

与霍尼韦尔 BPS 系列、恩智浦 NBP 系列等传感器相比, 本文研制的传感器芯片具有 0.2% 的精度, 优势较明显; 传感器的工作温度与对比器件基本一致, 经过优化后的传感器量程更窄, 更具电池热失控监测应用场景的针对性。

2.3 传感器模组电路

基于研制的压力芯片, 开发了具有 CAN 通讯功能的传感器模组, 设计了低功耗和唤醒功能, 为实现车用通讯和 BMS 集成做了初步准备。模组的电路原理如图 12 所示。

3 基于压力特征的电池热失控监测实验

3.1 热失控平台与信号采集

电池热失控的箱内压力信号的特征阈值设定如下:
(1) 压力上升速率 0.4—0.6 kPa/s, 持续 3 s, 压力异常,

热失控预警；(2) 实时压力值与 2 min 前的测量值之差 ≥ 3 kPa，压力异常，热失控预警。

实验使用了过热和过充两种热失控方式，选用 3 kPa 的压力特征值。实验在国联研究院的电芯级热失

控测试平台上进行，测试平台与实验装置如图 13 所示。实验中电芯选用了国轩高科的 52 Ah 方型三元锂电池，气溶胶传感器选用了霍尼韦尔的 BAS6C，CAN 卡为周立功 USBCANII+，直流电源为南通嘉科 JKDY300-20。

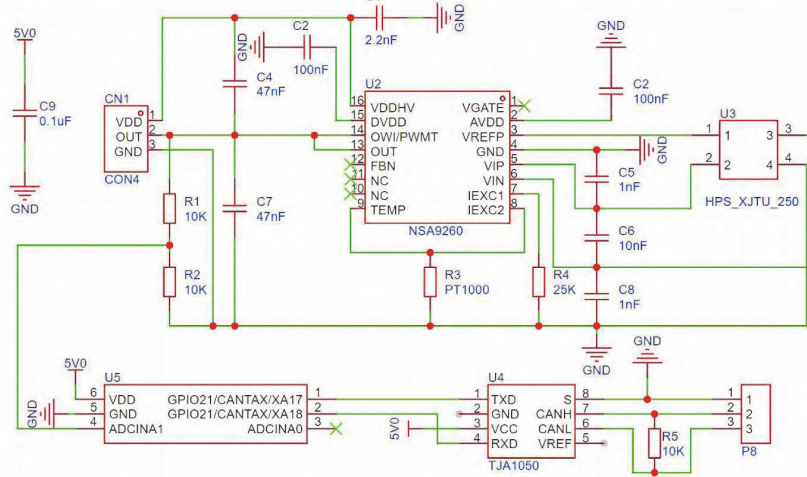


图 12 传感器模组电路原理图

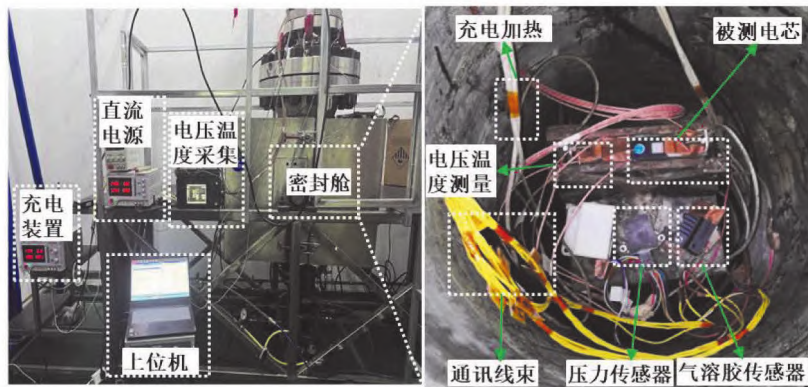


图 13 电池热失控测试平台与信号采集装置

3.2 过热式电池热失控实验

通过对电芯进行加热触发热失控，过热式热失控发生时，电池箱内的压力、气溶胶和电压信号变化规律如图 14 所示。

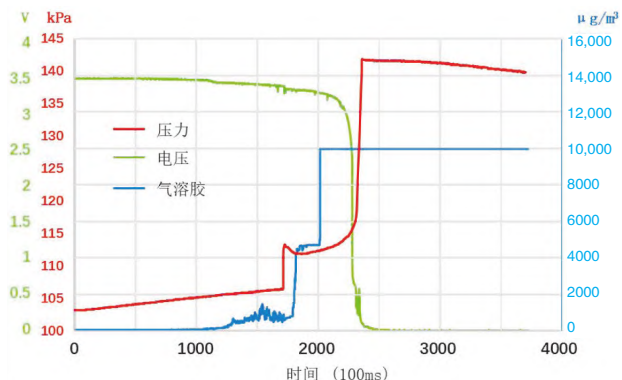


图 14 过热式热失控的压力信号变化

压力初始值为 103.2 kPa，106.2 kPa 的压力特征阈值出现在 155.6 s 处。气溶胶信号的第一个峰值出现在

152.6 s 处，为加热造成的颗粒物扩散形成的干扰信号。气溶胶信号快速上升沿出现在 171.8 s 处，并在 182.7 s 处，达到 $3000 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 的报警阈值。电池电压值始于 35 V，在 100 s 处缓慢下降，221.9 s 处快速下降。对于热滥用形式的热失控而言，从时间顺序上看，压力特征信号早于气溶胶信号 16.2 s，早于电压信号 66.3 s。上述结果说明压力信号可以作为过热式热失控早期预警的关键参数，电压与气溶胶作为辅助预警参数。

3.2 过充式电池热失控实验

电池过充也是造成锂电池热失控的重要原因。实验中电芯起始状态为 100% SOC，触发条件为 1/3 C。过充式电池热失控的压力变化如图 15 所示。

压力的初始值为 105.1 kPa，108.1 kPa 的压力特征值出现在 1170.1 s 处。气溶胶浓度在 1117.9 s 处快速上升到 $3000 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 的报警阈值。电池电压则在 882.9 s 处急速下降。电压特征信号早于压力和气溶胶信号 4 min

左右。上述结果说明对于过充式热失控, 电压信号是早期预警的关键参数, 压力和气溶胶信号可以作为预警的辅助参数。

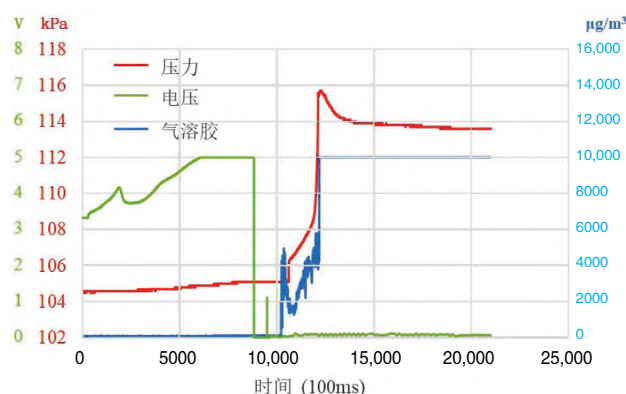


图 15 过充式热失控的压力信号变化

4 结束语

(1) 本文研制了一种高精度的绝压型压阻式 MEMS 压力传感器, 传感器量程为 50—250 kPa, 工作温度为 $-40\sim 120\text{ }^{\circ}\text{C}$, 测量基础误差为 0.2%, 传感器的精度较高, 线性度和重复性好。

(2) 通过离子注入重掺杂工艺的优化, 有效抑制了器件的温度漂移; 通过岛膜结构的设计, 将传感器的灵敏度提升了约 50%, 克服了重掺杂导致的灵敏度下降问题。

(3) 开发了专用的压力传感器模组, 实验发现, 对于过热式热失控, 压力信号的特征值早于气溶胶和电压信号; 对于过充式热失控, 压力信号晚于气溶胶和电压信号; 两种情况下, 本文研制的传感器都能给出准确的电池热失控触发信息。

Research on High-precision MEMS Pressure Sensor for Battery

Thermal Runaway Detection

WANG Shengqi¹, SHI Zhou², WANG Jiuhong²

(1. School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. School of Instrument Science and Technology, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: A high-precision absolute MEMS pressure sensor for thermal runaway detection of ion batteries has been developed. Using Silicon-On-Insulator as the substrate, a pressure chip with a size of $2.5 \times 2.5\text{ mm}$, a membrane size of $1.5 \times 1.5\text{ mm}$, and a membrane thickness of $40\text{ }\mu\text{m}$ is proposed; the key fabrication process of the sensor is studied, and the preparation and packaging of the sensor chip are completed. The test results show that the basic error of the sensor in the temperature interval of $-40\sim 120\text{ }^{\circ}\text{C}$ is $\pm 0.2\%\text{FS}$. The thermal zero drift of the sensor is $-0.025\%\text{FS}$ and the thermal sensitivity drift is $-0.08\%\text{FS}$ at the temperature point of $120\text{ }^{\circ}\text{C}$. The range of the sensor is 50—250 kPa. Two forms of battery thermal runaway experiments, overheating and overcharging, were carried out, and the timing patterns of pressure, aerosol, and battery voltage signals were obtained. The study shows that the developed MEMS pressure sensor meets the pressure monitoring requirements for thermal runaway warning of power battery.

Key words: thermal runaway; MEMS; pressure sensor; pressure sensitive chip

(责任编辑 王 磊)

参考文献:

- [1] 马堃耀, 李彬, 黄祖朋, 等. 动力电池热失控报警信号策略研究[J]. 现代工业经济和信息化, 2021, 11(3):158-159.
- [2] 陈素华, 白莹. 锂离子动力电池热失控机理及热管理技术研究进展[J]. 中国科学基金, 2023, 37(2):187-198.
- [3] KOCH S, BIRKE K P, KUHN R. Fast thermal runaway detection for lithium-ion cells in large scale traction batteries[J]. Batteries, 2018, 4(2):1-11.
- [4] 张微, 刘天宇. 新能源汽车车用芯片国产化技术瓶颈及发展建议[J]. 金属功能材料, 2024, 31(5):132-138.
- [5] 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.
- [6] PLÖBL A, KRÄUTER G. Silicon-on-insulator: materials aspects and applications[J]. Solid State Electronics, 2000, 44:775-782.
- [7] ZHAO Y L, ZHAO L B, JIANG Z D. High temperature and frequency pressure sensor based on silicon-on-insulator layers[J]. Measurement Science and Technology, 2006, 17(5):519-523.
- [8] LI T, SHANG H P, WANG B, et al. High-pressure sensor with high sensitivity and high accuracy for full ocean depth measurements[J]. IEEE Sensors Journal, 2022, 22(5):3994-4003.
- [9] 董海青, 张照锋. 离子注入结深的参数影响分析[J]. 中国新技术新产品, 2020(12):30-31.
- [10] HAO L, LI C, WANG L K, et al. Design and fabrication of a high-temperature SOI pressure sensor with optimized crossbeam membrane[J]. Micromachines, 2023, 14(5):1-14.
- [11] 赵立波, 赵玉龙, 李建波, 等. 倒杯式耐高温高频响压阻式压力传感器[J]. 西安交通大学学报, 2010, 44(7):50-54.
- [12] LIU G D, CUI W P, HU H, et al. High temperature pressure sensor using a thermostable electrode[C]. 10th IEEE International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems, Xi'an, China, 2015, 201-204.