

基于声表面波的全石英压力传感器研究

骆伟, 郝文昌, 都磊, 尹玉刚
(航天长征火箭技术有限公司 北京 100076)

摘要: 针对谐振器集成结构中压力和温度参量的非线性耦合问题, 本文提出了一种改进的双腔室结构的声表面波温度压力复合传感器, 开展了声表面波全石英压力传感器的设计与实验研究。本文基于有限元方法和微扰理论分析了石英基声表面波压力传感器的响应机理, 利用耦合模理论优化设计了三谐振器型敏感元件, 采用玻璃浆料键合实现了石英跨引线气密封装, 实现了声表面波全石英压力传感器的制备。测试结果表明: 所研制的声表面波全石英压力传感器在 0 °C~120 °C 工作温度范围内, 压力量程为 0~500 kPa, 线性度为 0.415% FS, 压力灵敏度为 551 kHz/MPa, 其灵敏度温度系数为 -0.134%。该声表面波全石英压力传感器的研制为后续实现传感器的无线无源测量奠定了基础。

关键词: 声表面波; 压力传感器; 玻璃浆料键合

中图分类号: TP212.1; TN305.94 文献标志码: A 文章编号: 2095-1000(2024)04-0132-05

DOI: 10.12347/j.ycyk.20230913001

引用格式: 骆伟, 郝文昌, 都磊, 等. 基于声表面波的全石英压力传感器研究[J]. 遥测遥控, 2024, 45(4): 132-136.

Study on All Quartz Package SAW Pressure Sensors

LUO Wei, HAO Wenchang, DU Lei, YIN Yugang

(Aerospace Long March Launch Vehicle Technology CO., LTD, Beijing 100076, China)

Abstract: In this paper, an improved Surface Acoustic Wave (SAW) temperature and pressure sensor with two chambers is proposed to solve the nonlinear coupling problem in the integrated structure suggested in earlier studies, and the design and experimental study of an acoustic surface wave all quartz pressure sensor is carried out. Based on the finite element method and perturbation theory, the response mechanism of the quartz-based SAW pressure sensor is analyzed, the coupled mode theory is used to optimize the design of the three-resonator-type sensitive element, and the glass paste bonding is used to realize the quartz cross-lead hermetic encapsulation, and the preparation of the SAW allquartz pressure sensor is realized. The test results show that the developed SAW all quartz pressure sensor has a pressure range of 0~500 kPa, a linearity of 0.415% FS, a pressure sensitivity of 551 kHz/MPa, and a temperature coefficient of sensitivity of 0.134% over the operating temperature range of 0 °C~120 °C. The development of this surface acoustic wave all quartz pressure sensor lays the foundation for the subsequent realization of wireless passive measurement of the sensor.

Keywords: SAW; Pressure sensor; Glass paste bonding

Citation: LUO Wei, HAO Wenchang, DU Lei, et al. Study on All Quartz Package SAW Pressure Sensors[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2024, 45(4): 132-136.

0 引言

声表面波(Surface Acoustic Wave, SAW)传感器是一种采用基于声表面波原理的结构作为其压力敏感结构的传感器, 具有无线无源的特点, 使其相对于传统的有线传感器和无线有源传感器来说, 具有特别的应用优势。工作时, 传感器敏感

单元(无电源模块)置于测量环境中, 借助于声表面波器件的压电转换原理, 完成待测物理信号和电信号的机电转换, 因而不存在电池使用环境限制和维护更换问题。载有待测量信息的电信号通过无线电波(无线连接)传输至无线读取模块, 完成信号的解调和结果显示, 由此可以减除线缆引入的布线以及附加载荷等问题, 特别适合于动

态旋转及对轻量化有要求的应用场合^[1-4]。

英国 Transense 公司和法国 FEMTO-ST 公司等基于声表面波器件特点,提出了经典的三个谐振器(压力、温度、参考谐振器)集成的复合结构^[5]。三个谐振器位于不同的敏感区域和敏感方向。其中,压力敏感谐振器位于压力敏感区域,将外界压力引起的形变转变为自身谐振频率的变化。参考谐振器和温度谐振器位于压力敏感区域以外,采用不同的排布方向。利用两者不同的温度特性,差分获得环境温度的测量。通过环境温度的测量,从而实现对压力谐振器的温度补偿,实现待测压力的精确测量。

然而,测试结果表明,其温度/参考谐振器仍存在明显受压力影响的情况,导致复合传感器中温度和压力测试数据存在交叉耦合,难以独立解耦,在一定程度上降低了测试精度。

为了解决谐振器集成结构中压力和温度参量的非线性耦合问题,本论文提供一种双腔室结构的声表面波温度压力复合传感器^[6]。该传感器在温度/参考谐振器和压力谐振器中间增加了隔离区域,形成了两个相互独立且相邻的双腔室,通过封装设计使温度/参考谐振器处于一个腔室,压力谐振器处于另一个腔室,利用增加固支边界隔离感压膜形变的传递,降低温度/参考谐振器的压力影响,便于独立解耦,在经典的三个谐振器集成传感器的基础上,进一步降低其温度和压力敏感区域的交叉耦合,提升传感器的测量精度。

1 理论分析

1.1 传感器压力响应机理分析

本文提出的改进的双腔室结构的声表面波温度压力复合传感器结构如图1所示。设计中,气密感压腔由感压膜和盖板组成,圆形感压膜直径为4 mm,厚度为100 μm。利用有限元软件 COMSOL MULTIPHYSICS 建立三维仿真模型,x轴与声波传播方向平行,y轴与声孔径方向平行,z轴垂直于(x,y)平面。在稳态研究下,提取了压电石英表面 SAW 器件上的应力应变。图2所示为压力作用下的膜片位移分布情况。

在准静态外力作用下,基于微扰理论,通过对运动方程的求解,可获得外界应力、应变影响下 SAW 传播速度的相对变化量^[7],如式(1)所示。

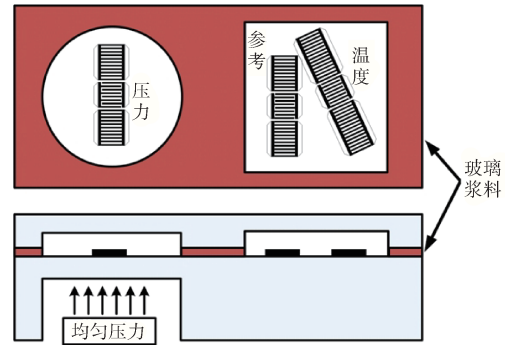


图1 全石英声表面波压力传感器结构示意图
Fig. 1 Schematic of all quartz SAW pressure sensor

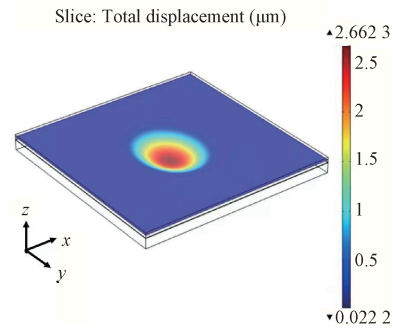


图2 感压腔表面位移分布
Fig. 2 Displacement distribution of pressure sensitive element

$$\frac{\Delta v}{v_0} = \frac{\int_V u_{i,k}^* \hat{c}_{ijkl} u_{j,i} dV}{2\rho\omega_0^2 \int_V u_y^* u_y dV} \quad (1)$$

其中, v 为速度, ρ 为质量密度, ω_0 为工作角频率, u_i 为无扰动下的声表面波位移, \hat{c}_{ijkl} 为 COMSOL 模型求解的偏载状态下的微扰张量(通过 COMSOL 建模仿真提取)。由 SAW 传播速度与谐振频率的关系可得

$$f = \frac{v}{\lambda} \quad (2)$$

$$\frac{\Delta f}{f} = \frac{\Delta v}{v} \quad (3)$$

其中, f 为工作频率。传感器的压力灵敏度 S_p 为

$$S_p = \frac{\Delta f}{\Delta P} \quad (4)$$

经计算,本设计中压力传感器的灵敏度为 $S_p = -520$ kHz/MPa。本论文仿真所使用的参数见表1。

1.2 谐振器设计仿真

本文的声表面波谐振器为单端对结构。电周期 λ_T 设置为7.1 μm,归一化电极宽度 $a/\lambda_T = 0.5\%$,归一化电极厚度 $h/\lambda_T = 2\%$,叉指换能器指数 $N_{\text{IDT}} = 160$,反射栅指数 $N_{\text{REF}} = 200$ 。

表 1 传感器仿真计算参数列表
Table 1 Parameters for calculations

参数	基片厚度/ mm	感压膜半 径/mm	感压膜 厚/mm	压力/ MPa	仿真		
					位移/ μm	应力/Pa	应变
数值	0.4	2	0.1	1	29.13	[1.561 8E8, 1.751 5E8, -1.534 2E6, 92 415.725 9, 1.888 1E5, 4.622 45]	[0.001 4, 0.001 4, 1.652 7E-4, 1.260 9E-4, 35 004E-6, 3.46E-6]

进而, 利用有限元方法、结合商用软件 COMSOL 实现对耦合模参量的提取^[8,9]。利用 P 矩阵级联技术, 相应地代入仿真软件提取的参量, 实现电学端、声学端的级联, 从而仿真得到器件的频率响应。图 3 给出了相应的三个谐振器结构的频率响应幅频特性仿真结果, 中心频率为 440 MHz。

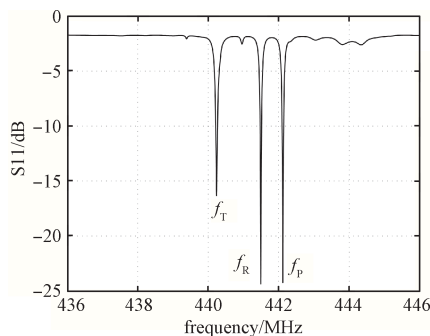


图 3 三个谐振器结构的频响特性仿真曲线 S11

Fig. 3 Simulated S11 of the structure with three resonators

2 工艺制备

2.1 玻璃浆料键合

SAW 压力传感器的敏感膜片和密封盖板通过真空密封键合形成所需要的压力参考腔, 并为 SAW 器件提供洁净的工作环境, 可有效避免气体环境对器件的损耗影响^[10]。

目前, 应用于气密封装的键合方法主要有直接键合、阳极键合、共金键合、粘结剂键合、玻璃浆料键合。其中, 玻璃浆料键合具有可图形化、气密性好、键合强度高以及热失配影响小(可根据材料选择不同热膨胀系数的浆料型号)的特点, 更重要的是其对表面的平整度要求低, 允许电极引线穿过键合层而不会降低键合质量, 从而降低工艺难度, 因而特别适合于 MEMS 器件的真空气密封装^[11,12]。本文即是采用玻璃浆料键合方法将传感器的感压膜片与封装盖板进行密封键合, 且器件电极穿过键合环引出, 实现电学信号的输入输出。

对印刷好的图形进行预烧结, 主要目的是挥

发掉玻璃浆料中粘合剂和溶剂, 使印刷后玻璃浆料接近熔融状态并使表面变得平滑, 避免浆料中有机物在后续的键合过程中产生气体从而在键合层中产生孔洞, 影响键合质量。图 4 所示为玻璃浆料烧结后的效果图, 对封装盖板和 SAW 感压膜片进行热压键合即可实现器件的气密封装。

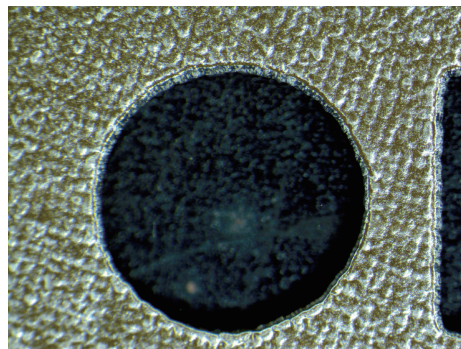


图 4 玻璃浆料键合结构预烧结后

Fig. 4 The printed glass paste after thermal conditioning for bonding

2.2 谐振器制备

本文提出的 SAW 压力传感器的感压膜片和密封盖板选择同型单晶石英, 在玻璃浆料的选型方面, 严格遵守材料热匹配原则, 使键合浆料与石英衬底的热膨胀系数尽量接近, 从而保障敏感元件芯片的热稳定性。图 5 所示为本文提出的三谐振器结构的 SAW 压力传感器的工艺流程示意图。文中采用铝作为金属电极材料, 以钛作为粘附层, 通过采用高精度光刻及薄膜沉积实现 SAW 叉指电极的制备^[13], 采用微工艺方法分别获得所需的压力敏感膜背腔结构和封装盖板的腔体, 最后利用键合或者高温玻璃封接技术, 实现感压膜片与盖板结构的真空封接, 形成真空参考腔, 并最终形成压力敏感芯片结构, 如图 6 所示。

2.3 测试及结果分析

利用压力控制器 (PACE6000, 控压精度 0.01%FS) 和恒温试验箱 (ECT-150-70-CP-AR, 控温精度 ± 0.1 °C), 搭建了系统测试平台。压力控制器

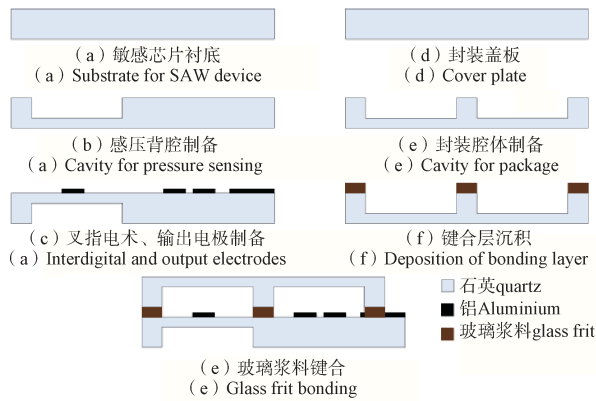


图5 全石英SAW压力传感器制备工艺流程
Fig. 5 Process flow of all quartz SAW pressure sensor

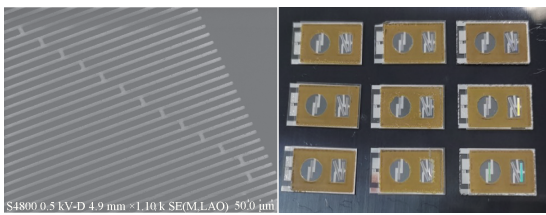
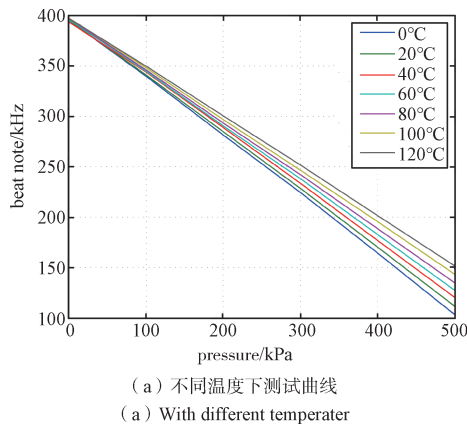
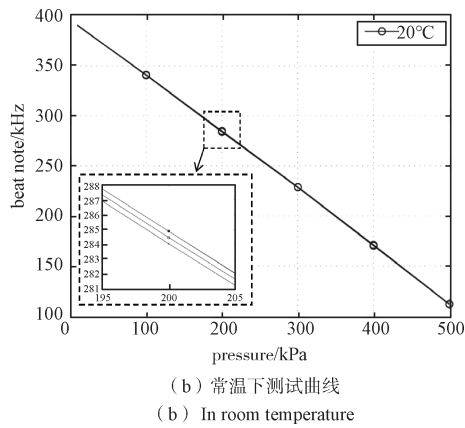


图6 全石英压力传感器制备
Fig. 6 Fabricated all quartz SAW pressure sensors

和恒温箱分别为器件提供测试所需的压力和温度，待温度、压力稳定后，采用网络分析仪(R3765CG，



(a) 不同温度下测试曲线
(a) With different temperater



(b) 常温下测试曲线
(b) In room temperature

图8 压力测试曲线

Fig. 8 Frequency shift versus pressure for SAW device

3 结束语

本文提出了一种全石英结构的SAW压力传感器结构，通过采用三谐振器的复合结构对压力测量信号进行温度补偿，实现压力信号的精确测量。利用微工艺方法完成高精度SAW叉指电极及石英腔体制备，并通过采用低温玻璃浆料键合方法，实现了全石英结构的SAW压力传感器制备。搭建

300 kHz-3.8 GHz)对所研制的SAW压力传感器性能进行测试，如图7所示。温度测试范围0℃~120℃，压力测试范围0 kPa~500 kPa。

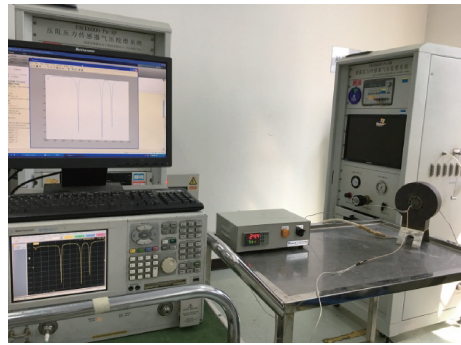


图7 SAW压力传感器系统测试平台

Fig. 7 Evaluation system for SAW pressure sensors

利用压力谐振器与参考谐振器之间的差值(即图3中 $f_P - f_R$)抑制共模影响^[4]，得到不同温度下的压力测试曲线，如图8(a)所示，传感器的压力灵敏度温度系数为-0.134%。同时，图8(b)给出了常温下三次压力正反行程的测试结果，通过最小二乘法线性拟合，获得传感器的灵敏度为-551 kHz/MPa，线性度为0.415%FS。

系统测试平台，对该传感器性能进行了表征。结果表明，该传感器在0℃~120℃温度范围内实现了0~500 kPa的压力测量，压力灵敏度温度系数为-0.134%。本文的研究结果为无线无源压力测量系统在特殊环境下的应用奠定了基础。

参考文献

[1] CUNHA M P D. Wireless sensing in hostile environments

- [C]// 2013 Joint UFFC, EFTF and PFM Symposium, 2013: 1337-1346.
- [2] FRANCOIS B, FRIEDT J M, MARTIN G, et al. High temperature packaging for surface acoustic wave transducer acting as passive wireless sensors[J]. Sensors and Actuators A, 2015, 224: 6-13.
- [3] WILLIAM W C, JUAREA P D. Emerging needs for pervasive passive wireless sensor networks on aerospace vehicles[J]. Procedia Computer Science, 2014, 37: 101-108.
- [4] HAO W C, LUO W, ZHAO G H, et al. Fem analysis of response mechanism for temperature sensors based on surface acoustic wave resonators[C]// 2019 13th Symposium on Piezoelectricity, Acoustic Waves, and Device Applications (SPAWDA). 2019: 1-5.
- [5] BALLANDRAS S, LARDAT R, PENAVERE L, et al. P11-5 micro-machined, all quartz package, passive wireless saw pressure and temperature sensor[C]// IEEE Ultrasonics Symposium. 2006: 1441-1444.
- [6] 郝文昌, 骆伟, 韩东祥, 等. 一种双腔室结构的声表面波温度压力复合传感器: 202210782554.6[P]. 2022-11-18.
- [7] TAZIEV R M, KOLOSOLSKY E A, KOZLOV A S. Pressure-sensitive cuts for surface acoustic waves in a-quartz[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 1995, 42(5): 845-849.
- [8] HAO Wenchang, LIU Jiuling, LIU Minghua, et al. Mass sensitivity optimization of a surface acoustic wave incorporating a resonator configuration[J]. Sensors, 2016, 16(4): 562.
- [9] YOU R, HAO WC, LIU J L, et al. Two-dimensional coupling-of-modes model for surface acoustic wave devices considering power flow angle[J]. IEEE Sensors Journal, 2022, 22(10): 9344-9350.
- [10] SINHA B K, LOCKE S. Thin-film induced effects on the stability of saw devices[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 1989, 36(2): 231-241.
- [11] KNECHTEL R. Glass frit bonding in handbook of silicon based MEMS materials and technologies (Second Edition)[M]. Amsterdam: Elsevier, 2015.
- [12] CHANG J S, LIN J Y, HO S C, et al. Wafer level glass frit bonding for MEMS hermetic packaging[C]// IEEE 2010 5th International Microsystems, Packaging, Assembly and Circuits Technology (IMPACT), 2010: 1-4.
- [13] 骆伟, 郝文昌, 郭伟龙, 等. 高温声表面波器件 Pt 电极的制备研究[J]. 遥测遥控, 2020, 41(2): 32-35.
LUO Wei, HAO Wenchang, GUO Weilong, et al. Study on platinum etching in SAW devices for high temperature application[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2020, 41(2): 32-35.
- [14] DIXON B, KALININ V, BECKLEY J, et al. A second generation in-car tire pressure monitoring system based on wireless passive SAW sensors[C]// IEEE Int. Freq. Control Symp. 2006: 374-380.

[作者简介]

骆 伟 1986 年生, 博士, 高级工程师。
 郝文昌 1989 年生, 博士, 高级工程师。
 都 磊 1987 年生, 学士, 工程师。
 尹玉刚 1982 年生, 硕士, 研究员。

(本文编辑: 杨秀丽)

(英文编辑: 赵尹默)