

# 高灵敏度硅酸镓镧声表面波压力传感器研究

陈高丁<sup>1,2</sup>, 李红浪<sup>2</sup>, 柯亚兵<sup>2</sup>, 朱波<sup>3</sup>, 陈淑芬<sup>1</sup>, 何世堂<sup>2</sup>

(1. 北京理工大学 光电学院, 北京 100081; 2. 中国科学院 声学研究所, 北京 100190; 3. 燕山大学 电气工程学院, 河北秦皇岛 066004)

**摘要:**为提高硅酸镓镧(LGS)声表面波(SAW)压力传感器的灵敏度,研究了一种采用点压式压力传递结构的 SAW 压力传感器。理论上采用压电微扰理论和有限元法结合,使用有限元法获得压力作用下 LGS 基片的应力、应变,并将该应力、应变代入叠加偏载的电弹方程和一阶微扰方程,求得传感器的压力灵敏度。计算表明 0~0.4 MPa 压力范围内其归一化压力灵敏度为  $0.065 \times 10^{-6}/\text{psi}$ ,与空腔结构 LGS SAW 压力传感器相比,该结构的灵敏度提高了约 9 倍。基于上述分析结构,制作了一种基于 LGS( $0^\circ, 138.5^\circ, 26.7^\circ$ )的点压式压力传递结构的 SAW 传感器,实验结果和理论分析吻合。

**关键词:**声表面波(SAW);压力传感器;硅酸镓镧(LGS);点压力式

**中图分类号:**TN65 **文献标识码:**A

## Research on High Sensitivity Surface Acoustic Wave Pressure Sensor Based on Langasite

CHEN Gaoding<sup>1,2</sup>, LI Honglang<sup>2</sup>, KE Yabing<sup>2</sup>, ZHU Bo, CHEN Shufen<sup>1</sup>, HE Shitang<sup>2</sup>

(1. School of Optoelectronic, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

2. Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

3. School of Electrical Engineering, Yanshan University, qinhuangdao 066004, China)

**Abstract:** In order to improve the sensitivity of surface acoustic wave(SAW) pressure sensor based on langasite(LGS), a SAW sensor of point pressure forced package structure is studied. The finite element method(FEM) and the perturbation method is theoretically adopted. The stress and strain of LGS substrate induced by pressure are calculated by FEM, and the pressure sensitivity is obtained by substituting the stress and strain into linear electro-elastic equations and first order perturbation equation. The calculated normalized pressure sensitivity is  $0.067 \times 10^{-6}/\text{psi}$  within 0~0.4 MPa, and about 9 times higher than the reported SAW LGS pressure sensor of the cavity structure. A SAW sensor based on LGS ( $0^\circ, 138.5^\circ, 26.7^\circ$ ) is designed, and experimental result matches the theoretical analysis.

**Key words:** surface acoustic wave(SAW); pressure sensor; langasite(LGS); point pressure forced

### 0 引言

声表面波(SAW)高温压力传感器因其体积小,无线无源,且能适用于高温环境等优势,成为近年来压力传感器的研究热点<sup>[1-2]</sup>。其基本原理是利用 SAW 器件感测表面压力扰动,实现对压力的高灵敏度感测。SAW 压力传感器通常使用石英作为压电基片材料,但石英在 576 °C 下会产生相变,无法应用于超高温环境。硅酸镓镧(LGS)材料耐温可达 1 470 °C,无相变且具有比石英更高的机电耦合系数,近年来,LGS 材料在 SAW 高温压力传感器的应

用技术成为国内外的研究热门。

Scott C. Moulzolf 等<sup>[3]</sup>制作的方形空腔结构的 LGS SAW 压力传感器,其利用压电微扰理论得到了适用于该结构的压力敏感切向,通过 LGS 方形空腔相邻两边的两个 SAW 压力传感器实现  $8.6 \times 10^{-6}/\text{psi}$  的灵敏度。针对类似的空腔结构, Khakpour R., Solmazrm R. M. 等<sup>[4]</sup>理论分析了不同空腔结构对压力灵敏度的影响,推导出数学解析表达式,分析得到压力灵敏度正比于空腔尺寸和基片膜厚的比值的平方。这种结构由于受到基片厚度、空腔尺寸的限制,空腔压力传感结构的 SAW 压力传

收稿日期:2015-08-01

基金项目:国家自然科学基金资助项目(11174318,11304346);国家高技术研究发展计划(“八六三”计划)基金资助项目(SS2013AA041103);北京市科技计划课题基金资助项目(Z141100003814016)

作者简介:陈高丁(1989-),男,重庆人,硕士生,主要从事声表面波传感器的研究。E-mail:2120130632@bit.edu.cn。

传感器的灵敏度也受到限制。据报道,采用点压式压力传递结构的 SAW 传感器<sup>[5]</sup>在灵敏度方面优势明显,其原因是传感器封装上盖表面的压力通过点接触集中作用在 LGS 基片表面,应变更大,压力灵敏度更高。

本文试图对采用此结构的 LGS SAW 压力传感器进行探索研究。理论上,拟采用压电微扰理论和有限元法结合,使用有限元法获得压力作用下 LGS 基片的应力、应变,并将该应力、应变变量代入叠加偏载的电弹方程和一阶微扰方程以求得传感器的压力灵敏度。结构上,考虑采用可伐合金材料的圆形点压力式封装,针对欧拉角(0°, 138.5°, 26.7°)的 LGS 基片,进行点压式压力传感器的计算,得到了不同温度、不同压力情况下的灵敏度。实验中,通过搭建实验平台,测试传感器的压力灵敏度,验证分析了理论计算结果。

### 1 SAW 传感器压力灵敏度理论模型

传感器结构由圆形上盖、矩形 LGS 基片和圆形底座 3 个部分组成,其结构及关键尺寸如图 1 所示。圆形上盖用于实现压力传递,其中心制作向下凸起的探针,压力施加于上盖的上表面,通过探针传递至 LGS 基片上。矩形 LGS 基片用于实现压力响应,作为压力敏感元件的 SAW 谐振器置于 LGS 基片上并靠近压力作用点。圆形底座用于固定 LGS 基片,其上制作 2 个条形尖坯,用于限制产生形变的区域,并使得 LGS 基片在压力作用下获得更大的应变变量。

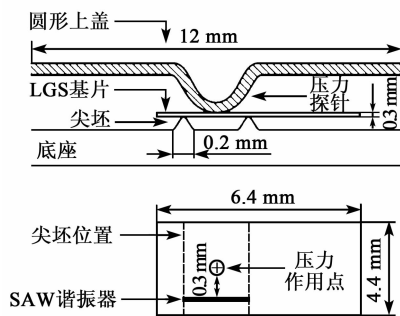


图 1 点压式压力传递结构示意图

测量原理是当压力施加在金属上盖上表面时,金属探针将造成 LGS 基片在两条金属尖坯中间区域产生明显应力、应变,从而改变该区域 LGS 基片的材料常数,影响 SAW 的声速,导致作为压力敏感元件的 SAW 谐振器谐振频率的变化。

本文利用有限元法对点压式结构的 LGS SAW 传感器进行仿真,计算得到静态压力作用下的 LGS 压电基片的应力、应变,将该应力、应变值应用于微扰理论,计算传感器的压力灵敏度。

### 1.1 有限元模型

为得到静态压力作用下 LGS 压电基片的应力、应变场,采用 COMSOL 软件对点压式压力传递结构进行有限元仿真。

为准确模拟 LGS 基片所处的压力环境及各部件间的连接关系,使用 COMSOL 软件对模型的材质、物理场、边界条件和温度条件进行了设置,如图 2 所示。圆形上盖使用 304 不锈钢材质,上表面设置为自由表面边界条件,圆形上盖四周设置为固定边界条件,并在上盖上表面施加 0~0.4 MPa 的边界负载条件。LGS 基片模型使用压电材料,为模拟其与底座的粘接情况,在矩形 LGS 基片的 2 个顶点处分别设置固定边界条件。LGS 底面在 2 个条形区域设置滚动边界条件,以模拟传感器底座的 2 个条形尖坯。该有限元模型可用于模拟常温及高温条件下 LGS 基片的应变情况,但由于后续实验条件为常温测试环境,故模型温度设置为常温 20 °C。利用 COMSOL 软件对模型进行自动网格划分,使用稳态分析计算得到 LGS 基片的应力、应变场。

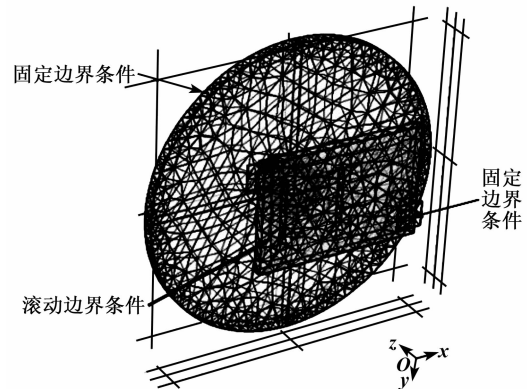


图 2 传感器封装结构的有限元模型及网格划分

### 1.2 微扰理论

Kalinin V 和 Leigh A 提出微扰理论<sup>[6]</sup>以研究 SAW 传感器的压力灵敏度。根据微扰理论,在相对于参考状态的 Lagrange 坐标描述下,利用有效材料常数的概念,结合叠加偏载的电弹方程和一阶微扰方程,得到了压力引起的应力、应变偏载下压电基片上 SAW 的压力灵敏度为

$$\frac{\Delta f}{f} = \frac{\Delta \omega}{\omega_m} = \frac{H_m}{2\omega_m^2} \quad (1)$$

式中:  $f = \frac{\omega}{2\pi}$ ;  $\omega_m$  为  $m$  阶本征谐振频率;  $H_m$  为扰动积分,其满足<sup>[7]</sup>:

$$H_m = - \int_{V_0} \hat{c}_{LyM\alpha} g_{\alpha, M}^m g_{\gamma, M}^m dV_0 \quad (2)$$

式中: \* 为共轭算子;  $V_0$  为积分区域; 各下角标为空间坐标;  $\hat{c}_{LyMa}$  为压力扰动引起的附加有效弹性常数;  $g_\gamma$  为电弹波动方程的归一化解, 并满足<sup>[7]</sup>:

$$g_\gamma^m = \frac{u_\gamma^m}{\sqrt{\int_{V_0} \rho_0 u_\gamma^m u_\gamma^{m*} dV_0}} \quad (3)$$

$$\hat{c}_{LyMa} = T_{LM} \delta_{\gamma\alpha} + c_{LyMaAB}^0 \bar{E}_{AB} + c_{LKM\alpha}^0 \tau_{\gamma,K} + c_{LyKM}^0 \tau_{\alpha,K} \quad (4)$$

式中:  $\rho_0$  为基片材料的密度;  $u$  为未受压力扰动时声表面波的位移;  $c_{LyKM}^0$ 、 $c_{LyMaAB}^0$  为未受压力扰动时的二、三阶弹性常数;  $T_{LM}$ 、 $\tau_\alpha$ 、 $\bar{E}_{AB}$  分别为压力作用引起的基片表面的静态应力、位移和应变, 可由 1.1 节中的有限元仿真计算得到。最终, 器件的压力灵敏度  $K_{fP}$  为

$$K_{fP} = \frac{\Delta f}{f} \frac{1}{P} \quad (5)$$

式中  $P$  为所受压力。

Aleksandrov, K. S., Taziev. R. M. 等<sup>[4]</sup> 分析

表 1 有限元仿真得到的应力和应变

| 分量    | XX                     | YY                     | ZZ                     | YZ                     | XZ                     | XY                    |
|-------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|-----------------------|
| 应力/Pa | $-3.39 \times 10^7$    | $-3.24 \times 10^7$    | $-6.25 \times 10^5$    | $-7.30 \times 10^5$    | $-1.42 \times 10^6$    | $3.74 \times 10^5$    |
| 应变    | $-3.24 \times 10^{-5}$ | $-2.24 \times 10^{-6}$ | $-2.19 \times 10^{-5}$ | $-4.75 \times 10^{-5}$ | $-9.23 \times 10^{-6}$ | $2.43 \times 10^{-5}$ |

将表 1 中的应力、应变值代入式(5)求得附加有效材料常数, 再由式(2)~(4)计算得到声场并代入式(1)中, 则得到频率相对改变量  $\Delta f/f$  为  $39.9 \times 10^{-6}$ ; 代入式(6), 得到压力灵敏度为  $3.51 \times 10^{-6}$  /psi; 最后代入式(7), 得到归一化压力灵敏度为  $0.065 \times 10^{-6}$  /psi。

## 2 传感器压力实验与结果分析

### 2.1 实验装置及方法

该实验设备由压力控制单元、温度控制单元和数据采集单元 3 部分构成, 如图 3 所示。压力控制单元由压力泵和气密腔构成, 用于提供传感器的压力环境, 传感器置于气密腔内, 压力泵提供 0~0.4 MPa 的压力给气密腔, 其精度可达 0.001 MPa。温度控制单元由恒温箱构成, 其精度可达到 0.1 °C, 用以保证传感器处于稳定的温度环境以避免实验过程中温度因素的干扰; 数据采集单元由 PC 机和矢量网络分析仪构成, 矢量网络分析仪用于测量传感

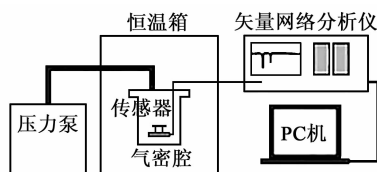


图 3 实验装置示意图

得出压力灵敏度正比于空腔尺寸和基片膜厚的比值的平方, 为消除基片结构参数的影响, 得到与基片材料有关的归一化压力灵敏度  $K_{fPA}$  为

$$K_{fPA} = \frac{1}{P \cdot A} \frac{\Delta f}{f_0} \quad (6)$$

式中:  $A=S/h^2$ ,  $S$  为基片压力腔的面积,  $h$  为压电基片的厚度。

### 1.3 LGS 压力灵敏度计算

根据以上分析, 利用有限元法得到了 LGS 基片在静态压力条件下的应力、应变值, 将该值代入由微扰法求解得到的压力灵敏度公式, 则可得到 LGS 基片的压力灵敏度。

有限元计算得到 SAW 谐振器的应变和应力如表 1 所示。假设应力、应变在 SAW 谐振器覆盖区域差别不大, 选取 SAW 谐振器中心点处的应力和应变值来表示谐振器所有区域的应力、应变以简化模型。

器的  $S_{11}$  参数, 由 PC 机搜索测得的  $S_{11}$  参数的峰值频率而得到传感器的谐振频率, 并通过不同压力下谐振频率的变化得到传感器的压力灵敏度。

测试时, 将制作好的点压式传感器放置于气密腔中, 实验以 0.1 MPa 的步进共取 0~0.4 MPa 5 个压力值, 使用矢量网络分析仪测量不同压力条件下传感器的  $S_{11}$  曲线, 提取  $S_{11}$  曲线峰值频率, 得到传感器谐振频率与压力值的响应曲线, 以此曲线得到传感器的压力灵敏度。

### 2.2 传感器压力灵敏度测试结果

为得到传感器在不同压力条件下的谐振频率以计算压力灵敏度, 该实验对传感器的  $S_{11}$  参数曲线进行测量, 并提取其峰值频率。在该实验中, 网络分析仪的扫频范围为 357~360 MHz, 传感器的  $S_{11}$  值测量结果如图 4 所示(在压力值为 0 的条件下)。由图

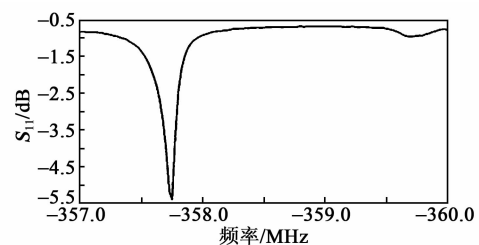


图 4 传感器  $S_{11}$  频域曲线测量图

可知,传感器的  $S_{11}$  曲线有明显的峰值,其对应的谐振频率为 357.8 MHz。

根据测量得到的谐振频率可观察到随着压力值的增加,作为压力敏感元件的谐振器由于产生应变而发生谐振频率偏移,且随着压力的增加,谐振频率单调递增。图 5 为谐振器的谐振频率随压力变化的测试图,其频率变化值  $\geq 0.016$  MHz。

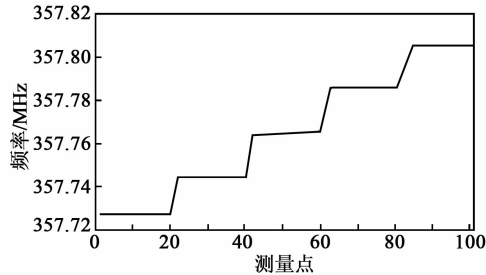


图 5 谐振器谐振频率随压力变化测试图

图 6 为谐振器谐振频率差随压力变化的拟合结果。由图可知,该曲线的斜率为 0.186 6 MHz/MPa,因此可得传感器的归一化压力灵敏度为  $0.0667 \times 10^{-6}$  /psi,与理论计算的归一化压力灵敏度  $0.065 \times 10^{-6}$  /psi 一致。将本文传感器与国外已报道的空腔结构的传感器对比如表 2 所示,方形空腔结构的归一化灵敏度是  $0.0071 \times 10^{-6}$  /psi,本文的灵敏度提高了约 9 倍,可见点压式结构的传感器具有较高的压力灵敏度。

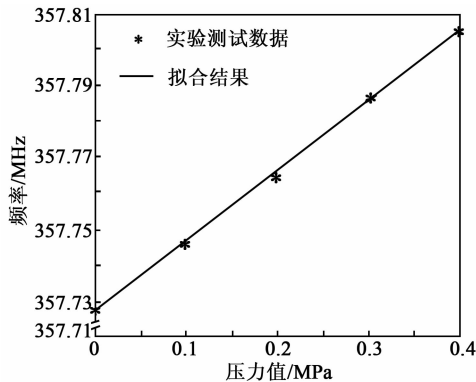


图 6 频率随压力变化曲线的线性拟合

表 2 本文传感器结构与国外已报道传感器结构对比

| 压力传感器结构  | $A=(S/h^2)$             | 灵敏度/<br>( $10^{-6}$ /psi) | 归一化灵敏度/<br>( $10^{-6}$ /psi) |
|----------|-------------------------|---------------------------|------------------------------|
| 本文点压式    | 5.876/0.33 <sup>2</sup> | 3.6                       | 0.0667                       |
| 国外方形空腔结构 | 49/0.5 <sup>2</sup>     | 1.4                       | 0.0071                       |

### 3 结束语

本文针对点压式压力传递结构的高灵敏度 LGS SAW 压力传感器,采用有限元法和微扰法理论结合的方法分析其压力灵敏度,并以 LGS( $0^\circ$ ,  $138.5^\circ$ ,  $26.7^\circ$ )基片材料为例进行理论分析和实验验证。理论和实验结果一致,得到其归一化压力灵敏度为  $0.065 \times 10^{-6}$  /psi,与常用空腔结构 LGS SAW 压力传感器(已报道测试结果为  $0.0071 \times 10^{-6}$  /psi)相比,该研究的灵敏度提高了约 9 倍。本文从理论和实验证实了点压式的压力传递结构封装对提高压力灵敏度的可行性,显示了其应用前景。

### 参考文献:

- [1] 向龙,秦廷辉,蒋平英.声表面波压力传感器的仿真与设计[J].压电与声光,2015,37(2):201-204.  
XIANG Long, QIN Tinghui, JIANG Pingying. Simulation and design of SAW pressure sensor[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2015, 37(2): 201-204.
- [2] 褚博文,丁杰雄,关利超.金属狭缝中 SAW 传感器信号传输的设计与优化[J].压电与声光,2015,37(2):206-212.  
CHU Bowen, DING Jiexiong, GUAN Lichao. The design and optimization of signal transmission for SAW sensor in the metallic slit[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2015, 37(2): 206-212.
- [3] SCOTT C M, ROBY B, ROBERT J L, et al. Langasite SAW pressure sensor for harsh environments[C]//Dresden; IEEE, IEEE International Ultrasonics Symposium, 2012: 1224-1227.
- [4] KHAKPOUR R, SOLMAZ R M. Analytical comparison for square, rectangular and circular diaphragms in MEMS applications[C]//Kuala Lumpur; IEEE, Electronic Devices, Systems and Applications, 2010.
- [5] DIXON B, KALININ V, BECHKEY J, et al. Second generation in-car tire pressure monitoring system based on wireless passive SAW sensors[C]//Miami; IEEE, International Frequency Control Symposium and Exposition, 2006: 374-380.
- [6] KALININ V, LEIGH A. Influence of non-uniform strain on characteristics of one-port SAW resonators[J]. IEEE Symposium on Ultrasonics, 2003, 2: 1412-1415.
- [7] BAUMHAUER J C, TIERSTEN H F. Nonlinear electroelastic equations for small fields superposed on a bias[J]. J Acoust Soc Am, 1973, 54: 1017-1034.
- [8] ZHANG X W, WANG F Y. Optimal selection of piezoelectric substrates and crystal cuts for SAW-based pressure and temperature sensors[J]. IEEE Trans Ultrason Ferroelectr Freq Control, 2007, 54(6): 1207-1216.