

声表面波应变传感器的温度补偿方法研究

郭霄鹏^{1,2}, 袁策¹, 朱波³, 柯亚兵², 李红浪²

(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:针对声表面波(SAW)应变传感器在测量应变过程中易受温度干扰的问题,提出了一种温度补偿法。在原有 SAW 应变片的基础上增加补偿片,用于补偿温度变化引起的附加应变值。实验结果表明,在 $-20\sim 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内,未经补偿的应变传感器由温度引起的附加应变变量最高为 $600\text{ }\mu\epsilon$,补偿后附加应变变量最高为 $43\text{ }\mu\epsilon$,温度干扰得到抑制,验证了该温度补偿法的可行性。

关键词:声表面波(SAW);应变传感器;压电晶体;微扰理论;温度补偿

中图分类号:TN65 **文献标识码:**A

Research on Temperature Compensation of Surface Acoustic Wave Strain Sensor

GUO Xiaopeng^{1,2}, YUAN Ce¹, ZHU Bo³, KE Yabing², LI Honglang²

(1. School of Optoelectronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China; 2. Institute of Acoustics Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; 3. School of Electrical Engineering, Yan Shan University, Qinhuangdao 066004, China)

Abstract: The surface acoustic wave (SAW) strain sensors were sensitive to the interferences from the temperature variation in the environment. A temperature compensated method was proposed to improve the sensitivity of the sensor. To compensate the additional strain caused by temperature, an uncompensated gage was added. The result shows that in the range of $-20\sim 100\text{ }^{\circ}\text{C}$, the additional strain caused by temperature was $600\text{ }\mu\epsilon$ without compensation, while the highest additional strain was $43\text{ }\mu\epsilon$ after compensation, and the temperature interference was suppressed. The feasibility of the temperature compensate method was verified.

Key words: surface acoustic wave; strain sensor; piezoelectric crystal; perturbation theory; temperature compensation

0 引言

应变的测量易受温度因素的影响,目前广泛使用的各种应变传感器都存在温度干扰问题。如传统的电阻应变片在温度变化时,敏感栅阻值会随之变化,产生附加应变值,发生零点漂移现象^[1]。声表面波(SAW)传感器可通过选择温度敏感度较低的基片切向,在一定程度上减小温度引起的附加应变值^[2-3],但此方法不能完全解决温度干扰问题。本文在原有 SAW 应变片的基础上增设温度补偿片,将应变片与补偿片频率值做差,消除附加应变值,并对温度补偿前、后传感器分别进行实验测试,通过分析实验结果,验证了该补偿方法的可行性。

1 基本理论

压电晶体都是各向异性晶体,不同切割方向的

压电晶体,其弹性常数、压电常数、介电常数及热膨胀系数等均可能有不同值,因此,在不同切向的压电晶体上激发的 SAW 特性不同^[4]。

温度、压力及应变等外界条件扰动也会引起 SAW 特性的改变^[5]。通过微扰理论进行分析,可得到外界扰动对 SAW 特性的影响关系。假设石英基片是一个半无限大的固体介质, $x_3=0$ 表面以上为真空, $x_3=0$ 表面以下为无限延伸^[4,6],如图 1 所示。

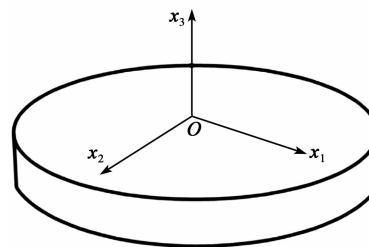


图 1 石英基片模型

收稿日期:2015-11-05

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(“八六三”计划)计划基金资助项目(SS2013AA041103)

作者简介:郭霄鹏(1990-),男,山西大同人,硕士生,主要从事声表面波应变传感技术的研究。E-mail:15210622879@163.com。导师简介:李红浪(1976-),男,湖北通城人,研究员,博士,主要从事声表面波应变传感技术的研究。

根据微扰理论可解出扰动下 SAW 角频率偏移量为

$$\Delta = \omega - \omega_0 = \frac{\hat{\epsilon}_{L,\gamma M_a} \int_{v_0} \bar{u}_{a,M} u_{\gamma,L} dV}{2\rho^0 \omega_0 \int_{v_0} \bar{u}_{\gamma} u_{\gamma} dV} \quad (1)$$

SAW 速度的相对变化量为

$$\frac{\Delta v}{v_0} = \frac{\Delta}{\omega_0} \quad (2)$$

当外界扰动条件为温度变化时,温度引起的频率偏移量为

$$\frac{\Delta f(T)}{f_0} = \frac{\Delta v(T)}{v_0} - \frac{\Delta \lambda(T)}{\lambda_0} \quad (3)$$

式中: ω 和 ω_0 分别为扰动下和无偏载下 SAW 角频率; u 为 SAW 位移; V 为模型体积; ρ^0 为无偏载时石英密度; $\hat{\epsilon}_{L,\gamma M_a}$ 为扰动作用后二阶弹性常数变化量; $\Delta f(T)$ 为温度扰动下 SAW 频率偏移量; f_0 、 v_0 、 λ_0 分别为无偏载时 SAW 频率、速度、波长; $\Delta v(T)$ 为温度扰动下 SAW 速度偏移量; $\Delta \lambda(T)$ 为 SAW 波长偏移量; γ 代表 3 个坐标。由式(3)可知,基片上 SAW 的频率会因温度扰动发生偏移。

2 原理分析

石英单晶是一种温度稳定性较高的压电晶体,被广泛使用^[3]。其中 ST-切(45°Y-切)石英上,SAW 频率受温度影响较小,温度灵敏度接近 0^[7]。这里使用 ST-切石英制作 SAW 应变传感器基片,有利于减小温度干扰,提高应变测量准确度。

ST-切石英温度灵敏度不完全为 0,制成的传感器在应变测量过程中仍受温度干扰。为提高应变测量准确度,本文在原器件的基础上设计了一种温度补偿方法。原器件结构为单片石英基片粘接于传感器封装底面上,粘接材料为高强度结构胶,应变扰动通过封装底面传递至石英基片,引起频率偏移。设计温度补偿后的器件,在原石英基片的基础上增量一块石英基片作为补偿片,补偿片与底面通过一种弹性软胶粘接,并且只粘接基片两端。经测试,此粘接法可有效隔绝应变传递,使补偿片仅感受温度扰动。补偿片结构如图 2 所示。

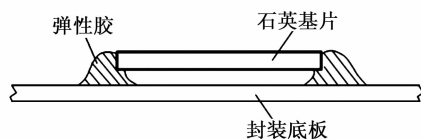


图 2 补偿片结构示意图

在设有温度补偿的器件上,两块石英基片完全

相同,分别用作应变片和补偿片。应变片在测量应变的同时也受温度扰动,频率偏移是 2 个因素综合作用的结果,而补偿片仅感受温度变化。两块基片位置接近,可认为其温度相同,因此,两块基片的频率偏移量之差即为应变引起的频偏,从而排除温度干扰。

3 实验验证

为测试本文提出的温度补偿法对 SAW 应变传感器零点漂移的抑制效果,搭建测试平台。该测试平台主要由高精度温箱、微动台及网络分析仪组成。高精度恒温箱可提供可控的稳定温度环境,微动台在产生应变量的同时可通过高精度应变传感器给出应变值,网络分析仪可测出 SAW 应变传感器的频率值。测试平台示意图如图 3 所示。

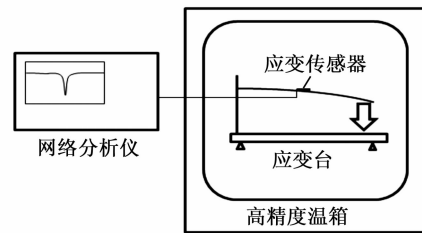


图 3 测试平台示意图

为对比补偿效果,首先测试未增设温度补偿片时,SAW 应变片在 -20~100 °C 内,应变量为 0 时的频率偏移情况,测试结果如图 4 所示。

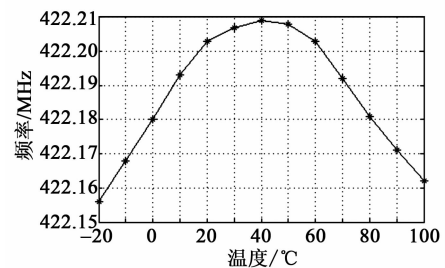


图 4 无温度补偿实验结果

由图 4 可看出,未增设补偿片的 SAW 应变片在应变量为 0 下频率发生明显偏移,即温度变化使应变片产生了附加应变值。由图还可看出,在 40 °C 时,频率约 422.210 MHz; -20 °C 时,频率约 422.155 MHz。可见相同应变下频率相差达 55 MHz。且实验结果与文献[7]中的 ST-切石英温频曲线吻合,验证了测试结果的准确性。

为测试增设补偿片后,应变传感器抗温度干扰的性能,这里分别在 -20 °C、20 °C、80 °C 下、0~1 000 $\mu\epsilon$ 范围内对 SAW 应变传感器的应变测量情

况进行实验,实验结果如图5~7所示。

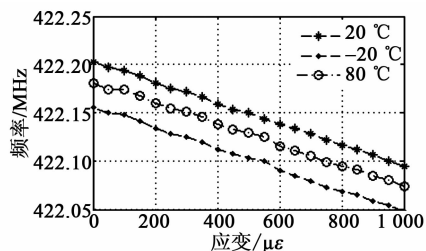


图5 应变片读数

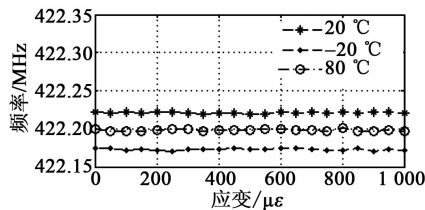


图6 补偿片读数

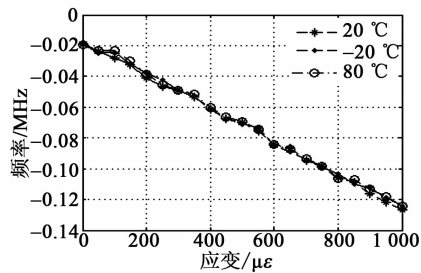


图7 应变片与补偿片频率差

由图5、6可看出,在不同温度下,应变片和补偿片的频率值均随温度发生偏移。应变片在测量相同应变时,因温度干扰而得到不同的测量结果。由图7可发现,应变片与补偿片的频率值做差后,可得一致的应变测量结果,仅在100 $\mu\epsilon$ 时有最大频率偏差4 kHz。

分析对比补偿前、后的应变测量结果,通过拟合计算,补偿前因温度变化引起的最大55 kHz频率偏移使附加应变约600 $\mu\epsilon$;补偿后最大4 kHz频率偏移对应约43 $\mu\epsilon$ 应变。所以,实验结果验证了此温度补偿法可有效减小应变测量时的温度干扰,可应用于传感器设计。

4 结束语

本文针对SAW应变传感器在测量应变时受到

温度干扰的问题,在原有SAW应变片的基础上增设了补偿片,并对SAW应变传感器在温度补偿前后的性能作了实验测试。实验结果表明,在温度补偿前温度干扰引起约600 $\mu\epsilon$ 的附加应变,补偿后附加应变减小至43 $\mu\epsilon$,有效减小了温度干扰,验证了本补偿方法的可行性。

参考文献:

- [1] 梁立凯. 电阻应变片测量中温度误差的补偿方法[J]. 呼伦贝尔学院学报, 2001, 9(1): 68-69.
LIANG Likai. The compensation method of temperature error in the measurement of resistance strain gauge[J]. Journal of Hulunbeir College, 2001, 9(1): 68-69.
- [2] 马伟方, 施文康, 刘艾. 声表面波器件温度敏感性研究[J]. 压电与声光, 2000, 22(5): 281-283.
MA Weifang, SHI Wenkang, LIU Ai. Study on temperature sensitivity of surface acoustic wave devices[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2000, 22(5): 281-283.
- [3] 李志鹏, 李晓英, 邵宪友. 基于COMSOL声表面波扭矩传感器的有限元分析[J]. 重庆理工大学学报(自然科学版), 2015(11): 17-22.
LI Zhipeng, LI Xiaoying, SHAO Xianyou. Finite element analysis of torque sensor based on COSMOL surface acoustic wave[J]. Journal of Chongqing University of Technology(Natural Science), 2015(11): 17-22.
- [4] 张向文, 王飞跃. 应用于智能轮胎的无源无线声表面波压力和温度传感器研究[D]. 北京: 中国科学院自动化研究所, 2005.
- [5] 李夏喜, 郭霄鹏, 白永强, 等. 基于石英基片的应变灵敏度分析[J]. 压电与声光, 2015, 37(5): 896-898.
LI Xiaxi, GUO Xiaopeng, BAI Yongqiang, et al. Analysis of strain sensitivity based on quartz substrate[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2015, 37(5): 896-898.
- [6] SCHULZ M B, MATSINGER B J, HOLLAND M G. Temperature dependence of surface acoustic wave velocity on α quartz[J]. J Appl Phys, 1970, 41(7): 2755-2765.
- [7] 吴荣兴, 袁丽莉. 温度效应对声表面波传播的影响[J]. 压电与声光, 2013, 35(1): 10-12.
WU Rongxing, YUAN Lili. Influence of temperature effect on propagation of surface acoustic wave[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2013, 35(1): 10-12.