

# 乐甫波器件温度特性实验研究

陈桂, 谢晓, 王文, 何世堂

(中国科学院声学研究所, 北京, 100190)

**摘要:**研究了基于 ST-90°X 石英基片和 SU-8 波导层的乐甫波器件的温度特性。采用电极宽度控制单向单相(EWC/SPUDT)结构和铝电极,设计制作了具有单一模式控制功能和低插入损耗的 150 MHz 剪切型声表面波(SH-SAW)延迟线器件,并在其表面涂覆不同膜厚的 SU-8 声波导层构成系列乐甫波器件。由于 SU-8 波导层与石英基片温度系数的相反极性特性, SU-8 膜厚直接影响到了乐甫波器件的温度特性。实验发现,覆盖不同膜厚的 SU-8 的乐甫波器件的中心频率随温度呈非线性变化,且在 60~80 °C 内, SU-8 膜厚为 0.95 μm 时,其频率温度系数约为  $0.830 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ 。

**关键词:**乐甫波; SU-8; 频率温度系数; ST-90°X 石英; 波导层厚度

**中图分类号:** TM131.4; TB212.2 **文献标识码:** A

## An Experimental Study on the Temperature Characteristics of Love Wave Devices

CHEN Gui, XIE Xiao, WANG Wen, HE Shitang

(Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

**Abstract:** This paper experimentally investigated the temperature characteristics of Love wave devices on ST-90° X quartz/SU-8 structure. The electrode width controlled single phase unidirectional distributed transducer (EWC / SPUDT) technique was used for the device design and the 150 MHz SH-SAW delay line devices with Al metallization were fabricated with single-mode feature and low insertion loss. Series of Love wave devices were developed using SU-8 guiding layer. Since the SU-8 guiding layer and ST-90° X quartz have complementary temperature coefficient of frequency (TCF), the thickness of SU-8 film significantly affects the temperature characteristics of Love wave devices. The experimental results showed that the non-linear temperature characteristics of Love wave devices, and TCF was observed and the temperature coefficient of frequency (TCF) was about  $0.830 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$  with the film thickness of 0.95 μm from temperature of 60 °C to 80 °C. The proposed Love wave devices showed a good prospect for physical or chemical sensors in the high temperature using the Love wave device developed in this paper.

**Key words:** Love wave; SU-8; temperature coefficient of frequency (TCF); ST-90° X quartz; thickness of guiding layer

### 0 引言

乐甫波是一种能支持水平剪切波的压电介质表面淀积一层低速波导层,通过波导效应将声能耦合至波导层中的一种剪切声波。由于声波导的作用,乐甫波能量将主要集中在波导层内,因此对外界扰动敏感,因而具有良好的质量灵敏度。近年来,乐甫波器件开始应用到气体传感器中<sup>[1-3]</sup>。与传统的瑞

利型声表面波<sup>[4]</sup>相比,基于乐甫波器件的气体传感器具有更高的灵敏度,同时由于其具有响应快,体积小,成本低,易集成等特点,因此乐甫波气体传感器极具应用前景。在乐甫波传感器应用中,温度稳定性对于传感器的性能具有重要意义,压电基片的温度敏感性使传感器响应随着测试环境温度变化而发生漂移,从而增加了传感器的基线噪声,影响传感器

收稿日期:2014-06-10

基金项目:国家自然科学基金资助项目(11074268,11274340)

作者简介:陈桂(1990-),女,湖北汉川人,硕士生,主要从事声表面波气体传感器的研究。E-mail:1025609372@qq.com。谢晓(1985-),男,湖南长沙人,博士后,主要从事声表面波气体传感器的研究。E-mail:xiexiao08@mails.ucas.ac.cn。王文(1976-),研究员,主要从事声表面波传感器的应用研究,承担国际及院级课题项目8项。在国内外期刊会议上发表论文90余篇,SCI收录32篇,EI收录近50篇。授予专利10余项。出版专著1部。

的检测下限,所以传统的 SAW 器件的温度稳定性能差,限制了其在温差大的环境中的应用。基于改善温度稳定性的考虑, Tomar 等<sup>[2]</sup>提出了通过控制波导层厚度,在常温环境下改善器件温度稳定性的优化设计理论。王文等<sup>[3-4]</sup>报道了基于覆盖 SU-8 波导层乐甫波器件的温度特性,由于 SU-8 与石英基片材料具有相反的温度系数极性,通过控制 SU-8 波导层厚度可获得常温下接近零温度系数的乐甫波器件。本文提出通过控制覆盖在 ST-90°X-石英表面的 SU-8 波导层厚度,用以实现乐甫波器件良好的温度特性。实验发现,这种 SU-8/ST-90°X-石英的乐甫波结构在 60~80 °C 具有趋于零的温度系数,这对于某些工作于该温度区间的传感器应用有很好的实际意义。施云芬等<sup>[5]</sup>报道了一种覆盖酞菁钡-聚苯胺化学敏感膜的 SAW 气体传感器,用于微量含磷毒气检测。该报道指出工作温度在 60~80 °C 时,传感器具有较快的响应时间和较好的检测灵敏度。但目前在 60~80 °C 工作温度范围内具有接近零温度系数的乐甫波器件报道较少,因此,针对此温度范围研发一种具有良好温度自补偿特性的乐甫波器件,对改善基于酞菁钡-聚苯胺化学敏感膜的气体传感器性能具有较好的现实意义。

本文通过在 ST-90°X-石英基片表面涂覆特定膜厚的 SU-8 声波导层,获得了在 60~80 °C 内接近零温度系数的乐甫波器件。

## 1 器件设计与制作

根据乐甫波的基本原理,压电基片激发的剪切型声表面波(SH-SAW),通过波导效应耦合到具有较低剪切声速的声波导,从而形成了乐甫波。声波导的耦合效率取决于波导层与压电基片间的剪切声速差值。文献<sup>[4]</sup>指出,两者剪切声速的差别越大,乐甫波模式的质量灵敏度就越高。另外,通过选取不同温度系数极性的基片材料和声波导材料,有望改善器件的温度稳定性能。表 1 为常见 SAW 基片材料和声波导材料的物理参数。本文选用 SU-8/ST-90°X-石英的结构,这种结构基片材料 ST-90°X-石英和波导层 SU-8 具有相反极性的温度系数,有利于改善器件的温度稳定性。此外,由于 SU-8 的剪切声速远小于 ST-90°X-石英,这种结构也有利于改善乐甫波气体传感器的灵敏度性能指标。

表 1 常见材料的物理参数表

常见压电材料	剪切声速/(m/s)	密度/(kg/m <sup>3</sup> )	温度系数极性
ST-90°X-石英	5 060	2 650	+
36°YX-石英	5 100	2 650	+
64°YX-LiNbO <sub>3</sub>	4 608	4 700	-
36°YX-LiTaO <sub>3</sub>	4 202	7 450	-
SiO <sub>2</sub>	2 850	2 650	+
SU-8	1 810	1 190	-

本文采用电极宽度控制单向单相延迟线结构<sup>[6]</sup>进行叉指换能器设计,运用光刻工艺制作了基于 ST-90°X-石英基片的乐甫波器件。如图 1 所示。

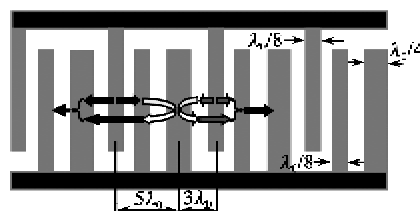


图 1 电极宽度控制单向单相结构示意图

换能器周期  $\lambda_0$  为 34  $\mu\text{m}$ ,换能器由宽度分别为  $\lambda_0/8$  和  $\lambda_0/4$  的指条组成。乐甫波器件的声波导层材料采用 Microchem 公司生产的 SU-8 2050 光刻胶。本文采用了 Microchem 公司生产的 SU-8 专用稀释剂,与 SU-8 2050 原胶按照 1:3 的体积比均匀混合配置成溶液,滴加在 ST-90°X-石英基片表面旋涂 40 s。本实验通过在 ST-90°X-石英基片表面以同样的转速分别旋涂不同体积的上述溶液,得到 3 种不同厚度的 SU-8 声波导层。基片接着被转移到 95 °C 烘箱烘烤 15 min,使溶剂成分充分挥发。使用接触式光刻机在紫外线 350~400 nm 条件下对覆盖 SU-8 的基片曝光 60 s,然后转移到 95 °C 烘箱烘烤 15 min。待基片自然冷却后,采用 MicroChem 公司的专用显影液显影,之后使用去离子水清洗残留显影液,并用氮气吹干,接着将基片置于 150 °C 烘箱烘烤 20 min。待基片自然冷却后,使用 Alpha-Step IQ 台阶仪测量 SU-8 膜厚。

## 2 实验与结果分析

本文首先使用 Agilent E5061B 网络分析仪对以上未覆盖 SU-8 的 SH-SAW 延迟线器件和 3 种不同 SU-8 膜厚的乐甫波器件在室温下进行了  $s_{21}$  参数测试,典型的 SH-SAW 延迟线器件和覆盖 0.95  $\mu\text{m}$  SU-8 声波导层乐甫波器件频率响应测试结果如图 2、3 所示。

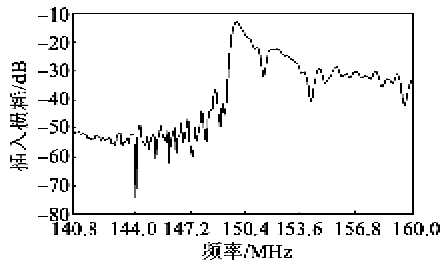


图 2 未覆盖 SU-8 的 SH-SAW 延迟线器件  $s_{21}$  参数测试结果

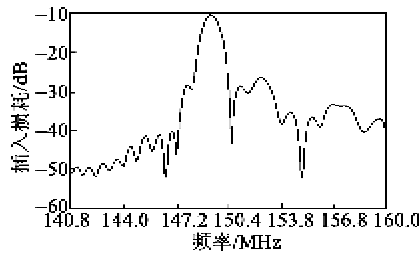


图 3 覆盖 SU-8 声波导层的乐甫波器件  $s_{21}$  参数测试结果

由图 3 可看出,未覆盖 SU-8 的 SH-SAW 延迟线器件的中心频率为 149.601 MHz,中心频率点损耗为 -11.3 dB,所研制的 SU-8 膜厚为 0.95  $\mu\text{m}$  的乐甫波器件中心频率为 149.342 MHz,中心频率点损耗为 -9.9 dB,损耗降低直接验证了乐甫波器件的波导效应,即波导薄层的乐甫波声能量集中于波导薄层,从而降低了声能的耗散,降低了损耗。

不同器件的频率温度特性测试。实验采用恒温箱对研制的器件进行温度控制,使用网络分析仪测量器件的频率信号,将恒温箱 RS232 控制接口和网络分析仪 GPIB 控制接口连接到电脑上进行实时采集数据,再将采集的数据进行处理,测试系统如图 3 所示。自制器件及测试盒置于恒温箱内,通过射频馈线接至网络分析仪,利用网络分析仪测试器件  $s_{21}$  参数随恒温箱内温度的变化,计算器件的温度系数。

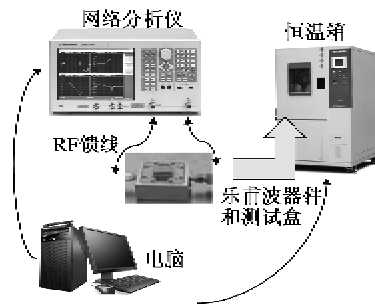


图 4 器件温度系数测试实验示意图

实验中,器件在恒温箱内从 0 升温到 120  $^{\circ}\text{C}$ ,每当恒温箱内温度达到程序设置的温度后,自动恒温运行 20 min 后进行该器件  $s_{21}$  参数测试和温度数据

采集,未覆盖 SU-8 的 SH-SAW 延迟线器件和 3 种不同波导层膜厚(见表 2)的乐甫波器件的温度系数测量的实验结果如图 5~8 所示。

表 2 4 种器件的温度系数测量结果

器件编号	SU-8 膜厚/ $\mu\text{m}$	60~80 $^{\circ}\text{C}$ 中心 频率变化/kHz	温度系数/ ( $10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ )
0#	0	93.51	31.17
1#	0.72	-13.96	-4.653
2#	0.95	2.48	0.830
3#	1.21	11.99	3.996

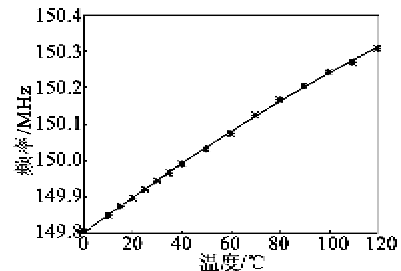


图 5 未覆盖 SU-8 的 SH-SAW 器件在 0~120  $^{\circ}\text{C}$  下中心频率的测试结果

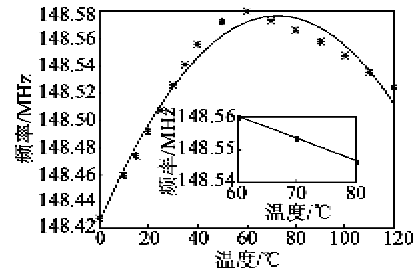


图 6 1# 乐甫波器件在 60~120  $^{\circ}\text{C}$  下中心频率的测试结果

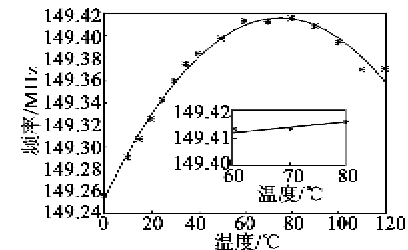


图 7 2# 乐甫波器件在 60~120  $^{\circ}\text{C}$  下中心频率的测试结果

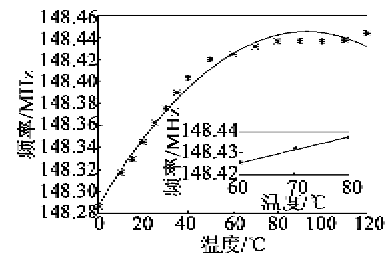


图 8 3# 乐甫波器件在 60~120  $^{\circ}\text{C}$  下中心频率的测试结果

由图 5~8 可看出,在 0~120 °C 内,未覆盖 SU-8 的 SH-SAW 器件的中心频率随温度呈线性变化,而覆盖 SU-8 的乐甫波器件的中心频率随温度呈非线性变化,且这 3 种器件在 60~80 °C 内频率的变化较小。

频率温度系数为

$$\tau_f = \frac{\Delta f}{f \cdot \Delta T} \quad (1)$$

式中: $\Delta T$  为温度范围; $\Delta f$  为该温度变化范围内频率的变化量; $f$  为该器件的中心频率。

由表 2 可得,在 60~80 °C 内,SH-SAW 器件的  $\tau_f$  较大,温度稳定性较差;当覆盖 SU-8 波导层且膜厚为 0.72  $\mu\text{m}$  时,其  $\tau_f = -4.653 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ ;当 SU-8 膜厚为 1.21  $\mu\text{m}$  时,其  $\tau_f = 3.996 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ ;当覆盖的 SU-8 膜厚为 0.95  $\mu\text{m}$  时,其  $\tau_f$  最优, $\tau_f = 0.830 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ 。

### 3 结束语

本文通过实验,测得了在 0~120 °C 内,SH-SAW 延迟线器件的中心频率随温度呈线性变化,3 种覆盖不同膜厚的 SU-8 的乐甫波器件的中心频率随温度呈非线性变化。且这 3 种器件在高温 60~80 °C 内频率的变化较小,而未覆盖 SU-8 的 SH-SAW 延迟线器件在高温 60~80 °C 温度区间内频率的变化较大,频率温度稳定性差。实验结果还发现,当 SU-8 膜厚为 0.95  $\mu\text{m}$  时,其频率温度系数最优,仅为  $0.830 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ ,改善了该温度条件下器件的温度稳定性,这对于推动基于乐甫波模式的传感器应用具有显著的实际意义。

(上接第 192 页)

- [30] SOLOMON M N, WEITZMAN P S, MCCLAY C P, et al. A monolithic six-port module[J]. IEEE Microwave and Guided Wave Letters, 1992, 2(8): 334-336.
- [31] BERGEAULT E, HUYART B, DELISLE Y, et al. A MMIC six-port reflectometer[C]//S. I.: Proceedings of the 35th Midwest Symposium on circuits and systems, 1992(2): 1485-1488.
- [32] BERNARD H, ANTOINE K. Integration of six-port circuit using MMIC technology[C]//S. I.: Proceedings of the 2012 IEEE MTT-S International Microwave Symposium, IMS, 2012: 1-3.
- [33] 熊祥正, 廖成, 肖华清. 微波集成六端口系统优化设计和校准方法[J]. 西南交通大学学报, 2009, 44(1): 20-

### 参考文献:

- [1] 何世堂, 王文, 谢晓, 等. 声表面波气体传感器研究进展[J]. 真空电子技术, 2013(2): 9-13.  
HE Shitang, WANG Wen, XIE Xiao, et al. Development of surface acoustic wave in gas sensor[J]. Vacuum Electronics, 2013(2): 9-13.
- [2] TOMAR M, GUPTA V, MANSINGH A, et al. Temperature stability of *c*-axis oriented LiNbO<sub>3</sub>/SiO<sub>2</sub>/Si thin film layered structures[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2001, 34(15): 2267.
- [3] WANG Wen, XIE Xiao, HOU Jiaoli, et al. Love wave devices with excellent temperature stability for application in gas sensor[J]. Sensors, 2012 IEEE, 2012: 1-4.
- [4] 王文, 侯娇丽, 刘明华, 等. 应用于气体传感器的多波导层 Love 波器件的温度特性研究[J]. 声学学报, 2013, 38(2): 181-187.  
WANG Wen, HOU Jiaoli, LIU Minghua, et al. Research on the temperature characteristic of Love wave device with structure of multi-waveguides used for gas sensor[J]. Chinese Journal of Acoustics, 2013, 38(2): 181-187.
- [5] 施云芬, 施云波, 孙墨杰, 等. 酞菁钡-聚苯胺修饰声表面波传感器及含磷毒气的检测[J]. 半导体学报. 2008, 29(5): 998-1002.  
SHI Yunfen, SHI Yunbo, SUN Mojie, et al. PdPc-Polyaniline modified surface acoustic wave sensor and phosphorus-containing gas detection[J]. Journal of Semiconductors, 2008, 29(5): 998-1002.
- [6] 程利娜, 刘明华, 李红浪, 等. 低损耗乐甫波传感器的实验研究[J]. 仪表技术与传感器, 2009(B11): 123-124.  
CHENG Lina, LIU Minghua, LI Honglang, et al. Experimental study of low-loss Love wave sensors[J]. Instrument Technique and Sensor, 2009(B11): 123-124.

25.

XIONG Xiangzheng, LIAO Cheng, XIAO Huaqing. Optimal design and calibration method of six-port system[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2009, 44(1): 20-25.

作者简介:高杨(1972-),男,四川绵阳人,博士,研究员,硕士生导师,主要从事微电子机械系统(MEMS)、机电引信的研究。中国微米纳米技术学会理事。承担“八六三”、国防预研、国防基础研究、部级基金等科研项目 10 余项;获部级一等奖 1 项、部级二等奖 1 项、部级三等奖 4 项。授权或申请专利 25 项;发表学术论文 70 余篇,其中 SCI/EI/CA 检索 30 余篇。