

声表面波压力传感器的仿真与设计

向龙¹, 秦廷辉², 蒋平英², 谢晓², 彭锦婕², 钱俊江²

(1. 重庆邮电大学 光电工程学院, 重庆 400065; 2. 中国电子科技集团第 26 研究所, 重庆 400060)

摘要:该文设计了一种基于声表面波(SAW)传感原理的无源无线压力传感器。阐述了 SAW 单端谐振器的原理,对 SAW 压力传感器的原理进行了分析。选择了基于类似两端固定梁的敏感结构并利用 ANSYS 软件对其敏感结构进行仿真、分析。利用 Mathcad 软件对 SAW 压力传感器进行建模、仿真。并根据仿真结果设计和制作了 SAW 压力传感器。测试结果表明,制作的传感器灵敏度较高,误差小,具备良好的压力频率特性。

关键词:声表面波;压力传感器;谐振器;ANSYS;Mathcad

中图分类号:TN65

文献标识码:A

Simulation and Design of SAW Pressure Sensor

XIANG Long¹, QIN Tinghui², JIANG Pingying², XIE Xiao², PENG Jinjie², QIAN Junjiang²

(1. College of Optoelectronic Engineering, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China;

2. 26th Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Chongqing 400060, China)

Abstract: A passive and wireless pressure sensor based on SAW has been designed in this work. Firstly, the principle of SAW one-port resonator was presented. Secondly, the principle of SAW pressure sensor was analyzed. The sensitive structure based on similar both ends fixed beam has been chosen and the simulation and analysis of the sensitive structure have been carried out by ANSYS software. SAW pressure sensor has been modeled and simulated by using Mathcad software. The tested results show that the fabricated sensor has the features of high sensitivity, very small errors and good pressure frequency.

Key words: surface acoustic wave(SAW); pressure sensor; resonator; ANSYS; Mathcad

0 引言

1885年,声表面波(SAW)就已被瑞利发现了,但直到1965年,SAW才被White等人利用叉指换能器(IDT)直接在压电介质上有效地激励出来。SAW是一种沿着固体表面传播的弹性波,其能量存储在固体表面,其传播速率比电磁波低4~5个数量级,因此其波长短。SAW压力传感器所特有的高频特性及器件基片材料的压电、逆压电效应,使其与传统压力传感器相比,具有测量精度高,抗干扰性强,微型、无源无线及成本低等优点,适用于易燃、易爆、密闭等特定环境下的遥测与传感^[1]。

1 SAW单端谐振器

用于压力传感器监测的有延迟线型和谐振型 SAW 器件。与延迟线型直接 SAW 压力传感器相

比,谐振型 SAW 压力传感器能以更小尺寸达到和延迟线型直接 SAW 压力传感器相同的测量灵敏度,且具有带宽窄,插入损耗低,遥测距离远,便于数字化测量等优点,因此被广泛研究^[2]。

图1为一个典型的单端 SAW 谐振器的结构及其近谐振等效电路。图中, C_m 和 L_m 分别为谐振器的动态电容和动态电感,反映了器件的压电性; C_0 为 IDT 的静电容,反映了器件的介电性; R_m 为阻尼引起的动态电阻^[3],反映了器件的损耗。IDT 处于中间位置,在 IDT 两边放置的是 2 个反射栅。在谐振器收到射频短脉冲激励时,IDT 会通过压电效应将输入的电信号转换成为机械波并在基底材料表面形成 SAW,SAW 传播到左、右两边的反射栅形成谐振。然后 SAW 又传回 IDT 后由于逆压电效应,机械波又转换为电信号。当 IDT 和反射器的谐振

收稿日期:2014-08-18

基金项目:重庆市科委基金资助项目(cstc2013yykfb40010)

作者简介:向龙(1988-),男,重庆万州人,硕士生,主要从事 SAW 传感器设计的研究。E-mail:739997745@qq.com。通信作者:秦廷辉(1968-),男,重庆奉节人,研究员级高工,副教授,主要从事科研生产管理和声表面波技术的研究。E-mail:qinth@sipat.com。

频率一致时,每个陡的谐振都会被检测到,且 IDT 与反射器间的宽度会明显影响器件的谐振特性。

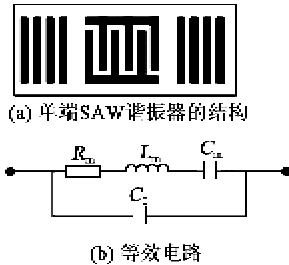


图1 单端 SAW 谐振器结构图及等效电路图

声表面波谐振器(SAWR)作为 SAW 振荡器的频率控制元件,是 SAW 压力传感器的核心,其性能的好坏直接影响着传感器的测试精度。因此 SAWR 的设计很重要。在此我们要设计出高品质因数(Q)、低插入损耗的 SAW 谐振器,就必须设计出最优的结构参数、镀膜厚度及 IDT 与反射栅的指数等参数。

谐振器的 Q 值和器件的频率稳定性有关,其为各个损耗的函数,包括表面传播损耗,材料传播损耗,体波转换损耗,反射器边缘的声辐射损耗等。当忽略二阶效应时,谐振器的无载 Q 值可近似^[4]为

$$Q = \frac{\pi L_{ef}}{(1 - |\Gamma|) \lambda_0} \quad (1)$$

式中 Γ 为反射栅反射系数,且有

$$|\Gamma| = \tanh(N_r |\Delta Z|) \quad (2)$$

式中: N_r 为反射栅的栅条数; L_{ef} 为有效谐振腔长度; ΔZ 为声阻抗不连续率,它与基片的机电耦合系数、反射膜厚及波长有关。当 $f = f_0$ 时, Γ 接近 1。

2 SAW 压力传感器的仿真与设计

2.1 压力传感器敏感结构设计

谐振式压力传感器由力学转换部分、谐振部分和支撑部分组成。其中谐振敏感部分是谐振式压力传感器的核心元件。

在这里利用 ANSYS 软件对其结构进行仿真分析。所有模拟均按照晶片采用 ST 切型石英,因为石英加工和制备工艺成熟,价格适中,满足大规模生产要求^[5]。晶片放置在两块结构钢支撑架上的情况进行仿真。

2.1.1 取不同材料对比

晶片结构尺寸均为为 $9 \text{ mm} \times 5 \text{ mm} \times 0.35 \text{ mm}$,材料采用 ST 切型石英和硅。图 2 为 ST 切型石英和硅的应变云图。由图可见,ST 切型石英的应变比硅的应变值好。

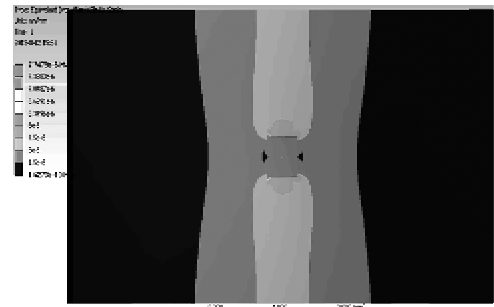
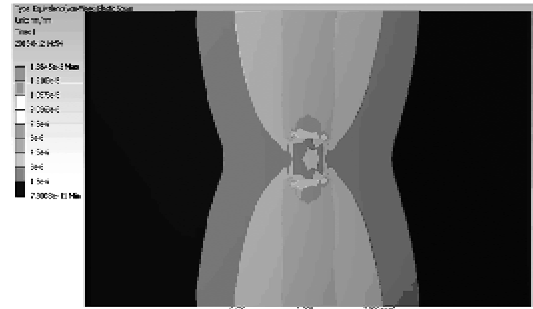


图2 ST 切型石英和硅的应变云图

2.1.2 同样压强及晶片结构,不同晶片厚度的对比

晶片长×宽均为 $9 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$,厚为 0.5 mm 及 0.35 mm 。压强为 100 kPa 均匀施加到平面。

1) 0.5 mm 厚的晶片应变图如图 3 所示,应变为 $(0.26 \sim 7.80) \times 10^{-7} \text{ mm}$ 。

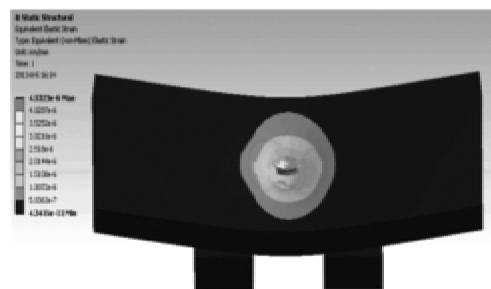
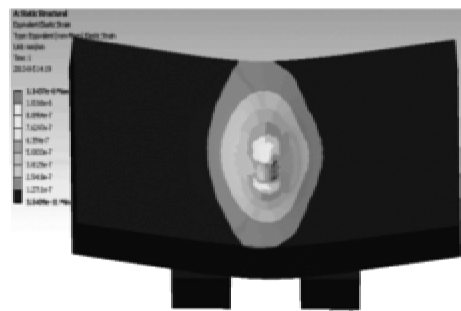
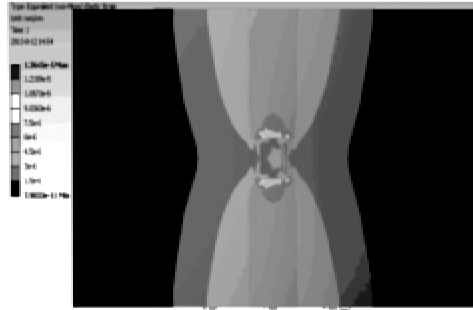
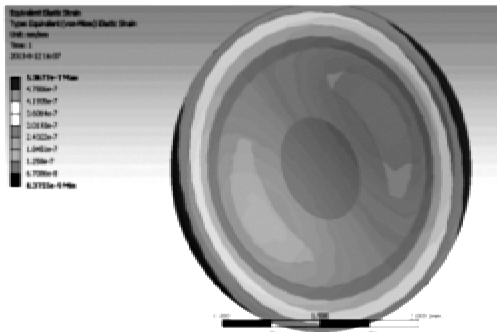


图3 0.5 mm 和 0.35 mm 厚的应变云图
2) 0.35 mm 厚的晶片网格划分及应变云图如

图 4 所示。应变范围为 $(0.5 \sim 1.5) \times 10^{-6}$ mm。由图可看出,减小衬底厚度可提高应变。



(a) 支撑架结构



(b) 四周约束结构

图 4 支撑架结构和四周约束结构应变云图

2.1.3 晶片约束方式的对比

1) 采用支撑架的约束方式。晶片尺寸为 $9 \text{ mm} \times 5 \text{ mm} \times 0.35 \text{ mm}$ 。

2) 采用四周约束的方式:晶片尺寸为 $\text{Ø}2.3 \text{ mm}$ 半径的圆片。

可见,四周约束的方式不但应变较小,且主要集中在边缘处。而支撑架的约束方式,在中心位置应变更大,也有足够的空间刻蚀谐振器。

综上所述,本文最终采用的石英单晶切型为 ST-X36°Y 切-X 传。晶片尺寸为 $9 \text{ mm} \times 5 \text{ mm} \times 0.35 \text{ mm}$ 。底座直径 $\text{Ø}11 \text{ mm}$,厚 2 mm 。这种切向的石英常应用于高稳定性的 SAW 谐振器中。支撑架选择了类似两端固定梁结构的谐振敏感部分来制作压力传感器。图 5 为敏感基片结构示意图。

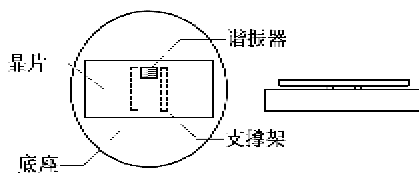


图 5 敏感基片示意图

2.2 压力传感器的工作原理

当载荷作用于 SAW 基片上时,外加压力引起

振动膜弯曲变形导致表面应力、应变分布发生变化,从而引起 SAW 的波长发生变化,实现对声波传播的干扰。引起声波相应变化从而导致传感器输出信号发生变化,最终导致谐振器中心频率发生变化,完成对压力的检测。

对于叉指间隔和反射栅指条间隔均匀分布的 SAW,SAW 波长 λ 和 IDT 周期长度 p_1 满足: $\lambda = 2p_1$ 时,SAW 在谐振腔内谐振,谐振型谐振器的谐振频率为其中心谐振频率,且

$$f = v/\lambda = v/2p_1 \quad (3)$$

式中: f 为谐振器的谐振中心频率; v 为 SAW 的波速。

$$\frac{df}{f} = \frac{dv}{v} - \frac{d\lambda}{\lambda} = \frac{dv}{v} - \epsilon_x \quad (4)$$

式中 ϵ_x 为波传播方向的应变。

SAW 谐振器的频率输出不仅与压力有关,还与温度等环境因素有关,敏感基片谐振器在被测压力 p 及环境温度 T 的作用下,输出的频率可近似^[5]为

$$f(p, T) = f_0 [1 - K_{fp} p - K_{fT} (T - T_0)] \quad (5)$$

式中: f_0 为谐振器未受扰动时的谐振频率; K_{fp} 为谐振器在参考状态下 ($p = 0, T = T_0$) 的频率温度灵敏度系数。在这里我们忽略温度对压力的影响。

2.3 器件的建模和仿真

本文采用的是谐振型 SAW 传感器,特征频率是其主要参数。当外加激励电信号的频率和 SAW 传感器的谐振频率相等时,激发 SAW 效率最高。本文选择了 Mathcad 软件用来设计出符合需要的 SAW 压力传感器。同时调整模型中的参数,然后仿真,得到相应的结果,并找出变化规律。

在 Mathcad 软件中进行建模,输入相应的数学公式、方程组、矩阵等。在这里频率范围设置的是 $430 \sim 435 \text{ MHz}$ 。在 SAW 压力传感器中, IDT 的结构参数变化对器件性能影响很大。利用软件对器件进行建模和仿真的目的就是通过对仿真的结果,找到相关参数的变化对器件性能影响的规律,为以后器件的设计提供依据。通过软件的计算,仿真结果,并综合考虑工艺条件等因素,我们设计并制作一种带 Al 薄膜的 SAW 压力传感器芯片。其中相应的 COM 参数和几何尺寸,如表 1 所示。其中, k_0 为反射系数, v_r 为 SAW 波速, a_n 为耦合系数, W 为有效叉指宽度, P 为 IDT 中心距离, P_r 为反射栅中心距

离, N 为 IDT 指条数, N_r 为反射栅指条数。

表 1 谐振器的 COM 参数和几何尺寸

参数	COM-P	参数	结构尺寸/mm
k_0	0.018	$W/\mu\text{m}$	120×3.62
$v_t/(m/s)$	3 133.85	S_1	7/8
a_n	5.5×10^{-5}	$N_r/\text{对}$	280
β_n	24.9×10^{-5}	$N/\text{对}$	30
c_{01}	6.8×10^{-17}	$P_r/\mu\text{m}$	3.512
		$P/\mu\text{m}$	3.512

3 SAW 压力传感器测试

3.1 网络分析仪测试

将制作好的传感器芯片用射频接头链连接到网络分析仪上, 利用网络分析仪测量其 Y_{11} , 可获 Y_{11} 与谐振频率特性, 如图 6 所示。

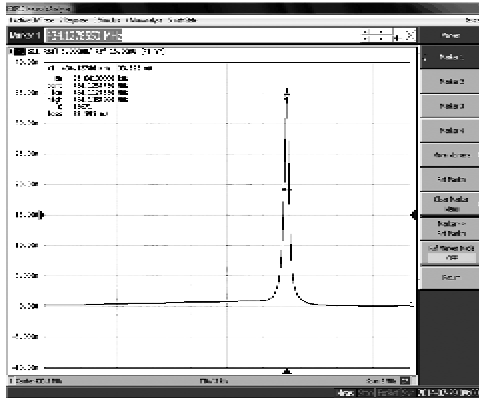


图 6 Y_{11} 测试曲线

由图 6 可知, 设计的压力传感器具有高 $Q(Q > 15\ 000)$ 及低的插入损耗, 满足了设计要求。图中所示值即为常温、常压下的谐振频率 f 。当增加压力时可测量另一个谐振频率 f' , 从而可计算出两两的频率差值 Δf 。即可得出传感器的频率特性。

3.2 压力频率测试

压力频率特性测试的实验是在恒定的室温环境中进行的, 这里我们忽略温度对谐振器的影响。本文设计的压力传感器理论上可测量到 551.6 kPa。由于增加压力的装置的最大承受压力为 551.6 kPa, 为了安全, 此次试验压力的设置范围为 0 ~ 413.7 kPa, 表 2 为不同压力时测试出来的频率。由表 2 测试出来的频率值画出传感器的压力-频率曲线(见图 7)。由图可看出, 当压力递增时传感器的频率与压力变化有较好的线性关系, 这说明本文设计的压力敏感单位在原理上是可行的。实验测量的压力灵敏度高达 0.002 9 MHz/kPa。可以看到 SAW 压力传感器具有良好的压力-频率特性。

表 2 压力-频率表

压力/kPa	频率/MHz	压力/kPa	频率/MHz
0	434.096 40	206.85	434.163 80
68.95	434.118 50	275.80	434.186 10
100	434.127 86	344.75	434.208 50
137.90	434.141 30	413.70	434.230 80

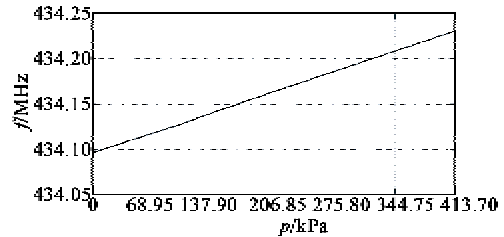


图 7 压力-频率曲线

4 结束语

本文设计了一种基于类似两端固定梁方式的 SAW 压力传感器。通过对两端固定梁结构的力学分析找出了梁的最大应变区域, 并在这个区域分布一个单端口 SAW 谐振器, 使其充分利用梁的应变使传感器的灵敏度最大。并利用 Mathcad 软件, 对 SAW 压力传感器芯片进行建模、仿真。所制备的传感器芯片具备良好的压力-频率特性, 具有良好的传感性能。

参考文献:

- [1] 刘文辉, 李平, 文玉梅. 一种无源无线 SAW 压力传感器结构设计[J]. 传感技术学报, 2007, 20(4): 770-773. LIU Wen hui, LI Ping, WEN Yumei. A structure design for passive wireless SAW pressure sensor[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2007, 20(4): 770-773.
- [2] 冯冠平. 谐振传感理论及器具[M]. 北京: 清华大学出版社, 2008: 301-363.
- [3] HASHIMOTO K Y. 声表面波器件模拟与仿真[M]. 王景山, 译. 北京: 国防工业出版社, 2002: 135-154.
- [4] 李海宁, 丁杰雄, 姜忠, 等. 用于狭缝中的 SAW 应力传感器的设计与制作[J]. 压电与声光, 2013, 35(6): 771-774. LI Haining, DING Jiexiong, JIANG Zhong, et al. Design and process of SAW stress sensor in slit[J]. Piezoelectris & Acoustooptics, 2013, 35(6): 771-774.
- [5] 王磊, 刘文, 卢小荣. 面向电网应用的 SAW 温度传感器设计[J]. 压电与声光, 2012, 34(6): 817-819. WANG Lei, LIU Wen, LU Xiaorong. Design of SAW temperature sensor for grid-oriented application[J]. Piezoelectris & Acoustooptics, 2012, 34(6): 817-819.
- [6] 吉小军. 高温偏载条件下的声表面波压力传感器理论研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2004.