

文章编号:1004-2474(2014)01-0008-04

声表面波温度传感器的仿真与设计

吴展翔¹, 刘文¹, 卢小荣²

(1. 华中科技大学 武汉光电国家实验室, 湖北 武汉 430074; 2. 常州智梭传感科技有限公司, 江苏 常州 213164)

摘要:利用有限元软件 COMSOL 对声表面波温度传感器进行仿真。声表面波温度传感器基底材料为 YX-切石英单晶,并在石英上镀 ZnO 薄膜,叉指换能器和反射栅采用铝电极。通过仿真研究了叉指换能器的高度、金属化率变化对声表面波温度传感器性能的影响,并根据仿真结果设计和制作了一种镀 ZnO 薄膜的 SAW 温度传感器。测试结果表明,制作的传感器灵敏度较高(8.8 kHz/°C),误差小,具备良好的温度-频率特性。

关键词:声表面波;温度传感器;ZnO 薄膜;叉指换能器;COMSOL

中图分类号:TN384 文献标识码:A

Simulation and Design of SAW Temperature Sensor

WU Zhanxiang¹, LIU Wen¹, LU Xiaorong²

(1. Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China;

2. Changzhou Smartsaw Sensor Technology Co., Ltd., Changzhou 213164, China)

Abstract: The surface acoustic wave (SAW) temperature sensor is simulated using finite element software COMSOL. ZnO film on YX-cut quartz crystal is used as base material for SAW temperature sensor, and aluminum electrodes are used as the inter-digital transducer and reflectors. The impact of the performance of SAW temperature sensor due to the change of the height of inter-digital transducer and the metallization ratio is studied through simulation. According to the result of the simulation, SAW temperature sensor plated on ZnO films is designed and produced. Test results show features of high sensitivity (8.8 kHz/°C) and very small error with good temperature-frequency characteristics.

Key words: surface acoustic wave (SAW); temperature sensor; ZnO film; interdigital transducer (IDT); COMSOL

0 引言

声表面波 (SAW) 是一种在固体中沿表面传播的弹性波,其能量集中于固体的表面,在大多数固体中 SAW 的传播速度在 2 000~10 000 m/s,比电磁波速度低 4~5 个数量级。制备于压电材料表面的叉指换能器 (IDT) 可有效地激发和截取 SAW,通过这种方式能方便的传播和处理信号。近年来,随着物联网技术的兴起和发展,SAW 技术也在传感器领域得到了广泛的应用,其中无源无线 SAW 温度传感器以其无源无线,抗干扰性强,测量精度高及成本低等特点,在如高压开关柜内温度测量等领域得到了越来越广泛的应用。

在 SAW 传感器的研制过程中,对器件进行仿真真是其中一个重要的环节。常用于 SAW 器件仿真的模型有脉冲响应模型、Mason 等效电路模型、耦合模理论模型等,根据这些理论编写数值计算程序

对 SAW 器件进行仿真。近年来,随着计算机技术的飞速发展,有限元 (FEM) 法及相关的有限元分析软件在 SAW 器件仿真中也得到了越来越广泛的应用。COMSOL Multiphysics 是一款大型的有限元分析软件,它具备高效的计算能力及强大的多物理场耦合功能。本文还采用 COMSOL Multiphysics 软件对 SAW 温度传感器进行建模和仿真,研究了叉指换能器 (IND) 不同参数的变化对器件性能带来的影响。

1 SAW 温度传感器的基本原理

SAW 在基底材料上传播时,其传播特性会因外界物理量 (如温度、压力等) 的变化而发生改变,利用这种特性将这种变化读取出来就可用来开发各种传感器。SAW 传感器分为谐振型和延迟线型^[1]。其中谐振型 SAW 温度传感器的结构示意图如图 1 所示。

收稿日期:2013-03-21

作者简介:吴展翔(1990-),男,湖北武汉人,硕士生,主要从事声表面波传感器的研究。刘文(1960-),男,湖北人,教授,博士生导师,主要从事面向光纤通信的光电子器件的研究。

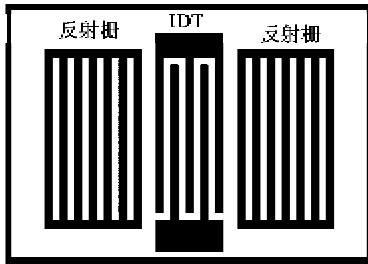


图 1 谐振型 SAW 温度传感器结构

压电基底材料因为 IDT 的激发产生压电效应,将输入电信号转换为声信号在基底材料表面上形成 SAW,SAW 传播到左、右两边的反射栅形成谐振。然后 SAW 传回 IDT 后由于逆压电效应,声信号又转为输出电信号。SAW 谐振频率为

$$f(T) = f(T_0)[1 + b_0(T - T_0) + b_1(T - T_0)^2 + \dots] \quad (1)$$

式中: $f(T)$ 和 $f(T_0)$ 分别为温度 T 和 T_0 下对应的谐振频率; b_0 、 b_1 代表对应的各阶温度系数,而这些系数均与基底材料有关^[2]。通过读取输出电信号频率,找到电信号的变化量,就可获得温度变化的信息,达到温度传感的目的。

2 SAW 温度传感器的仿真与设计

2.1 基底材料的选择

由于 SAW 温度传感器是基于压电效应和逆压电效应进行传感,其基底材料的选择很重要。常用的压电基底材料有石英、铌酸锂、钽酸锂、压电陶瓷等。压电材料应尽量选择 SAW 波速小,压电耦合系数高的材料^[3]。在上述材料中,石英材料有着较高的一阶温度系数和很低的二阶温度系数,波速较铌酸锂和钽酸锂低,此外其加工和制造工艺成熟,价格适中。因此我们选择石英单晶作为 SAW 温度传感器的压电基底材料。

此外,由式(1)可知,在材料选择上,不仅要获得尽可能大的一阶温度-频率变化系数,还要考虑到尽量避免材料的高阶温度系数所带来的非线性效应。而石英材料中不同切型对应的温度系数也各不相同,因此对晶体材料切型的选择也至关重要,应保证其温度系数在一定范围内呈线性分布。本文采用的石英单晶切型为 YX 切。

近年来,压电薄膜 SAW 器件也得到了广泛关注,通过选取不同特性材料组成的薄膜介质可实现各自材料的优势,有利于提高 SAW 器件的性能,并拓宽其应用范围^[4-5]。由于石英相对于铌酸锂、钽酸锂等材料,其机电耦合系数相对较低,所以本设计在

石英材料上镀层 ZnO 薄膜,可提高其机电耦合系数。

2.2 器件的建模与仿真

本文设计的 SAW 传感器采用谐振器型,特征频率是其主要参数。当外加激励电信号的频率与 SAW 传感器的谐振频率相等时,激发 SAW 的效率最高。因此,为了设计出符合需要的 SAW 温度传感器,就需利用 COMSOL 软件建立模型,同时调整模型中的参数,通过仿真不同设计参数的模型,得到对应的结果,找出其中变化规律。

在 COMSOL 中我们建立的二维模型如图 2 所示。利用周期性边界条件,我们将 IDT 简化为由一对电极组成的结构。本文设计的 SAW 芯片波长 λ 设置为 $7.2 \mu\text{m}$ 。建模中设置的基片宽度与 SAW 相等,均为 $7.2 \mu\text{m}$ 。叉指电极中心距离 $p = \lambda/2 = 3.6(\mu\text{m})$,叉指宽度 a 设置为 $1.8 \mu\text{m}$ 。由于 SAW 的能量大部分集中在表面 $1 \sim 2$ 个波长的深度以内,因此建模时只需将基底材料设置在 $2 \sim 5$ 个波长的深度条件。本文中,我们设置为 $20 \mu\text{m}$ ^[6]。当基底材料和叉指电极间的 ZnO 薄膜厚为波长的 0.3 倍时,可获得较小的相速度及较大的机电耦合系数,本文中 ZnO 薄膜厚度设置为 $2 \mu\text{m}$ ^[7]。叉指电极采用 Al 材料。模型的边界条件设置为:

- 1) 基底部分的下表面边界为固定边界条件。
- 2) 上表面边界为自由边界条件。
- 3) 基底部分和薄膜部分的左、右边界条件设置为周期性条件,其 x 方向位移 u , y 方向位移 v 及电势 V 相等^[8]。

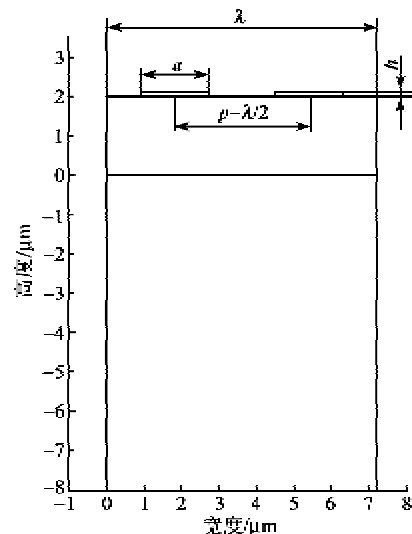


图 2 建立的 SAW 温度传感器模型
模型建立后划分网格,然后进行模态特征频率

分析。模态是结构的固有振动特性,每一个模态具有特定的固有频率、阻尼比和模态振型。这些模态参数可由计算或试验分析取得,这样一个计算或试验分析过程称为模态分析。不同的频率对应不同的声波振型,这其中包括声体波振型和 SAW 振型。根据 SAW 的能量大部分集中在离表面 1~2 个波长长度的范围内的特点,我们可从不同频率对应的波动振型中提取出 SAW 对应的振型,获取特征频率。图 3 为声波振型。

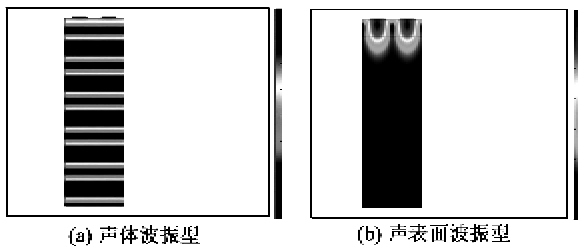


图 3 声波振型

2.3 IDT 参数的变化对器件的影响分析

在 SAW 温度传感器中, 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根据仿真的结果,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。在 IDT 的设计参数中,金属化率和叉指电极高度是其中很重要的因素,它们的变化会对器件性能造成影响。

金属化率(η)定义为 $\eta = a/p$, 其中 p 为叉指电极中心距离。当 $\eta = 0$ 时,即压电基底材料上无电极,基底处于自由化边界条件;而当 $\eta = 1$ 时,表明压电基底材料被一层金属材料薄膜覆盖,基底处于金属化边界条件。在这两种条件下,正谐振频率(f_{sc+})与反谐振频率(f_{sc-})会退化为一个特征频率。取不同的 η 值,分别仿真计算其谐振频率,结果如表 1 所示。

表 1 特征频率随金属化率变化

η	f_{sc+}/MHz	f_{sc-}/MHz
0.25	390.91	391.76
0.33	390.64	392.14
0.50	390.28	392.84
0.67	390.27	393.26
0.75	390.43	393.33

由以上结果可知,当 $0 < \eta < 1$ 时,随着 η 的增大,正谐振频率逐渐减小,在 $\eta > 0.67$ 后又上升;而反谐振频率则在下降。此外,仿真中模态的特征频率与 433 MHz 有一定差距,是因为 ZnO 薄膜使 SAW 器件产生频散效应,且 SAW 声场主要集中在 ZnO 薄膜内,这和普通 SAW 器件集中在基底材料

上不同,故其频率相对传统 SAW 器件较低,波速也比石英上的 SAW 慢。

除金属化率外,叉指电极高度(h)对 SAW 的传播特性及 SAW 器件的性能也有一定的影响。因此对 h 进行分析和仿真同样重要。在本次仿真中采用 $\eta = 0.67$ 的叉指电极设计,即电极宽度为 $2.4 \mu\text{m}$ 的 IDT 电极,同时在石英基底上镀 $2 \mu\text{m}$ 的 ZnO 薄膜。设置不同的 h ,观察 SAW 传播性能与 h 间的关系。表 2 为仿真计算结果。

表 2 特征频率随 h 的变化

$h/\mu\text{m}$	f_{sc+}/MHz	f_{sc-}/MHz
0.10	390.64	393.05
0.12	390.28	393.26
0.14	389.85	393.44
0.16	389.40	393.61
0.18	388.91	393.75
0.20	388.39	393.87

由表 2 可见,当叉指电极高度逐步增高时,正、反谐振频率均逐步下降。

2.4 器件的建模与仿真

根据仿真结果,并综合考虑工艺条件等因素,我们设计并制作一种带 ZnO 薄膜的 SAW 温度传感器芯片。传感器芯片采用 YZ-切石英基底,基底上 ZnO 薄膜厚为 $2 \mu\text{m}$ 。IDT 由 200 对叉指电极组成,同时采用 Hamming 函数作变迹加权,以减小频率响应时的旁瓣。IDT 周期长度为 $7.2 \mu\text{m}$,叉指指条宽度为 $2.4 \mu\text{m}$ 。IDT 左、右两边反射栅各为 200 条。IDT 电极与反射栅均采用 Al,其电导率高且化学性能稳定,易加工和制作,其高度均为 $0.12 \mu\text{m}$ 。

3 SAW 温度传感器的测试

3.1 网络分析仪测试

将制作好的传感器芯片用射频接头连接到网络分析仪上,利用网络分析仪测量其反射系数(S_{11}),可获得其反射系数与谐振频率特性,如图 4 所示。

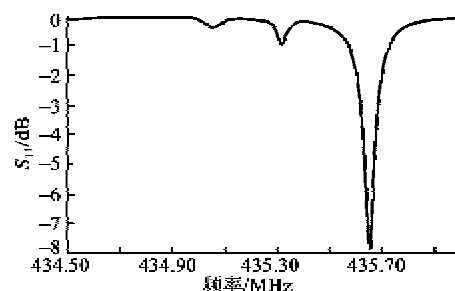


图 4 反射系数测试曲线

由图 4 可知,所设计的 SAW 温度传感器芯片在主谐振点旁边仍存在小的旁瓣,其原因是镀了 ZnO 的石英相对于没有镀 ZnO 的石英材料,其性能参数有变化。此外, IDT 在 ZnO 薄膜上的沉降效应及芯片的制造加工工艺不能达到完全的精确,这些因素都造成了旁瓣的出现。

3.2 温度-频率测试

将该传感器芯片放入温度循环试验箱中进行测试,测试芯片在不同温度下的测量频率,实验结果如表 3、图 5 所示。

表 3 SAW 温度传感器的温度-频率测试

标称温度/℃	测量频率/MHz	标称温度/℃	测量频率/MHz
-20	435.204 8	60	435.919 6
-10	435.298 2	70	436.015 6
0	435.389 0	80	436.108 7
10	435.479 7	90	436.189 5
20	435.566 3	100	436.252 5
30	435.659 7	110	436.358 8
40	435.747 2	120	436.440 6
50	435.834 7		

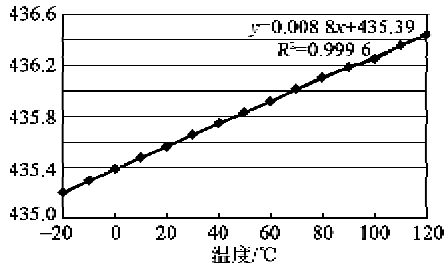


图 5 SAW 温度传感器的温度-频率曲线

表 3 和图 5 的实验结果表明,在 $-20 \sim 120$ °C 温度范围内当温度变化时, SAW 温度传感器芯片输出频率和环境温度呈良好的线性关系。测量各点拟合成的温度-频率曲线,其斜率为 0.008 8,可认为所设计的 SAW 温度传感器的灵敏度为 8.8 Hz/°C。实际测量的温度-频率值与拟合后的曲线的线性拟合度为 0.999。可以看到,镀 ZnO 的 SAW 温度传感器具备良好的温度-频率关系。

4 结束语

本文利用 COMSOL 软件,对 SAW 温度传感器芯片进行建模,改变了相应参数并对不同参数对应

的模型进行了仿真,且设计并测试了在基底材料上镀 ZnO 的 SAW 温度传感器。以上仿真和实验结果表明,镀 ZnO 的 SAW 温度传感器芯片在 $-20 \sim 120$ °C 温度范围内具备良好的温度-频率特性,灵敏度为 8.8 kHz/°C,具备良好的传感性能。不可否认,镀 ZnO 后反射系数曲线中出现的旁瓣会成为 SAW 温度传感器应用中的隐患,这是因为镀 ZnO 后基底材料的压电特性已发生了改变,需有针对的作出设计。同时,在 IDT 加权及制造工艺方面的改进也是消除旁瓣响应的下一步研究步骤。

参考文献:

- [1] KALININ V A. Passive wireless strain and temperature sensors based on SAW devices[C]//New York, USA: IEEE, George Heiter Proceeding of the, 2004 IEEE Radio and Wireless Conference, 2004: 187-190.
- [2] 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.
- [3] 王琰. 无源无线声表面波温度传感器的设计[D]. 杭州: 浙江大学, 2011.
- [4] 郭天天,沈青,周明安. 一种高精度自适应温控算法的设计与实现[J]. 四川兵工学报, 2013(3): 71-74. GUO Tiantian, SHEN Qin, ZHOU Mingan. Design and application of a high-accurate adaptive temperature control algorithm[J]. Journal of Sichuan Ordnance, 2013(3): 71-74.
- [5] 潘峰. 声表面波材料与器件[M]. 北京: 科学出版社, 2012: 220-221.
- [6] 朱树众. 声表面波器件的模拟与仿真[D]. 天津: 天津理工大学, 2011.
- [7] HASHIMOTO K 著. 声表面波器件模拟与仿真[M]. 王景山, 刘天飞, 孙玮, 译. 北京: 国防工业出版社, 2002: 201-202.
- [8] 阮鹏,陈智军,付大丰,等. 基于 COMSOL 的声表面波器件仿真[J]. 测试技术学报, 2012, 26(5): 422-428. RUAN Peng, CHEN Zhijun, FU Dafeng, et al. Simulation of surface acoustic wave device based on COMSOL [J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2012, 26(5): 422-428.