

多层微结构声表面波温补滤波器仿真设计

刘晓智¹,董加和²

(1. 四川护理职业技术学院,四川 成都 610100;2. 中国电子科技集团公司第二十六研究所,重庆 400060)

摘要:声表面波滤波器(SAWF)工作频率在宽温度范围内高度稳定是电子系统频谱控制的关键。已成为当前SAWF发展的主要技术方向。该文提出了基于多层微结构压电材料的SAWF温度补偿技术方案,实现了基于钽酸锂(LT)压电基片上的温度补偿SAWF设计、仿真,并获得了满意的实验结果。基于LT/Si复合片法实现的SAWF频率温度系数在全温范围(-55~+85℃)内达到 $25 \times 10^{-6}/\text{℃}$;基于SiO₂/LT薄膜补偿法实现的SAWF频率温度系数在全温范围(-55~+85℃)内小于 $10 \times 10^{-6}/\text{℃}$ 。研制的温度补偿声表面波滤波器(TC-SAWF)达到要求,已在系统中得到应用。

关键词:声表面波;温补滤波器;多层微结构

中图分类号:TN65 **文献标识码:**A

Design and Simulation of Temperature Compensated SAW Filter Based on Multi-layers Micro-structure

LIU Xiaozhi¹, DONG Jiahe²

(1. SiChuan Nursing Vocational College, Chengdu 610100, China;

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

Abstract: The high stability of the operating frequency of SAW filter during a wide range of temperature is the key factor of spectrum controlling in the electronic system. The temperature compensated technology has become the main technical direction of the current SAW filter development. A temperature compensated SAW filter technological scheme based on multi-layer micro-structure piezoelectric material was presented in this paper. The design and simulation of temperature compensated SAW filter based on lithium tantalite (LT) piezoelectric substrate were realized and satisfied results were obtained. The temperature coefficient of frequency (TCF) of SAW filter, which was based on a overlapping of LT on Si wafer, is up to $25 \times 10^{-6}/\text{℃}$ during the full temperature range (-55℃ to +85℃). The temperature coefficient of frequency (TCF) of SAW filter based on SiO₂/LT temperature compensated method is less than $10 \times 10^{-6}/\text{℃}$. The developed temperature compensated SAW filters (TC-SAWFs) have been applied to the systems.

Key words: surface acoustic wave; temperature compensated filter; multi-layers micro-structure

0 前言

20世纪末的海湾战争是现代新型战争的起点,其关键是基于电磁信号为载体的信息高速传输与应用。对信息高速传输载体的电磁信号频谱的控制,是现代新型战争敌我双方争夺新制高点。电磁频谱控制包括范围和精度控制,而基于技术逻辑电磁频谱精度控制目前广泛采用滤波器。自海湾战争以来,滤波器获得了广泛发展和应用,已成为现代电子系统的关键基础器件。SAWF是20世纪60年代

发展起来的一种基于压电材料声电转换的滤波器^[1],在30~3000MHz频段内对电磁频谱的控制具有独特的技术优势,已在通信、雷达、电子对抗、导航、识别等系统中获得广泛应用^[2]。特别是在现代移动通信系统中,SAWF以其小体积、高性能、低功耗、高稳定、低成本等特点,已在第一~第三代移动通信系统移动终端中获得广泛应用。特别是当前正在致力应用和发展的第四、五代移动通信系统中,SAWF已成为其射频前端信号抗干扰、抗混叠滤波

不可或缺的关键信号处理器件,得到了大量应用和广泛重视^[3]。

随着军民用电子系统的进一步发展和电磁频谱资源的不可再生性特点,电子系统频谱间干扰和频谱资源的高效利用已成为当前系统发展和应用的关键技术问题,特别是 SAWF 覆盖的频段范围内,矛盾更突出。为此,作为该频段射频信号滤波主要的器件 SAWF,提出必须满足系统发展新需求的高精度频谱控制技术,如 SAWF 的高精度频率、高精度带宽、高矩形度、低损耗等 SAWF 性能参数控制及温度稳定性问题,特别是宽温范围下的 SAWF 频率温度稳定性问题,已成为当前 SAWF 技术发展和器件应用的关键问题之一。理论上,SAWF 频率随温度变化是由于其压电材料中 SAW 传播速度随温度变化而产生的。为此,稳定 SAWF 频率随温度变化问题,显然必须提升 SAWF 的压电材料的温度稳定性,目前国际上较普遍采用的两种技术途径是复合片法和 SiO₂ 薄膜补偿法。为此,本文提出了基于钽酸锂(LiTaO₃,LT)压电材料多层声子/介质微结构温度补偿的 SAWF 设计、仿真,并获得了满意的实验结果:复合片法 SAWF 全温范围(-55~+85℃)内温度系数达到 $15 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$,优于目标值 $25 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$; SiO₂ 薄膜补偿法全温范围(-55~+85℃)内温度系数达到 $3 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$,优于目标值 $10 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 。

1 多层微结构声表面波温补滤波器设计

1.1 设计原理

SAWF 结构如图 1 所示,包括压电基片、声电叉指换能器(输入和输出),在输入换能器上加电信号,由逆压电效应,压电基片表面激励声表面波向两边传播延迟,经过输出换能器,由正压电效应,输出换能器就有同步电信号从负载 R_L 输出。基于此,通过适当设计叉指换能器(IDT)各电极指条的结构和位置、重迭长度等物理尺寸,或在声传播的路径上进行适当控制,可以对 SAW 信号参数进行延迟、加权、移相,实现对输入电信号的滤波、相关、卷积等处理。

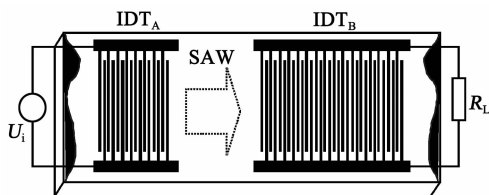


图 1 SAW 滤波器结构原理图

多层微结构 SAWF 的基本原理如图 2 所示。图中, λ 为 IDT 的周期长度,微米量级, h_{SiO_2} 为 SiO₂ 的厚度,亚微米级; h_{met} 为金属指条的厚度,亚微米级。在单晶衬底上制作 IDT 结构,然后再在其上面生长一层另一种材料膜,两种材料的温度系数相反,用以降低频率温度系数(TCF)。

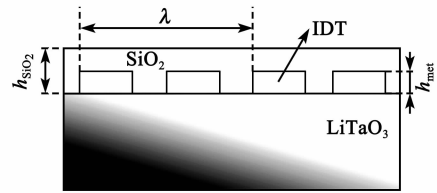


图 2 SiO₂/IDT/LT 结构的剖面图

SAWF 工作频率温度补偿即用带有温度特性的材料常数进行多层结构建模,然后研究结构的频率温度系数变化,寻找各层膜厚度,以得到器件工作频率最低温度变化系数。由于单晶 LiTaO₃ 的 TCF 为负,而 SiO₂ 的 TCF 为正。目前国际上常用的温度补偿有两种方法:

1) 在 LiTaO₃ 上生长或溅射一层一定厚度的 SiO₂,将 IDT 做在 SiO₂ 和 LiTaO₃ 之间,这个方法理论上可得到 0 的 TCF,但会降低机电耦合系数值并增加传播损耗。

2) 用 LiTaO₃ 与 Si 的复合结构,这种方法与前一种方法相比有更大的机电耦合系数和更小的传播损耗,这种方法还能提高热散能力,但为了提高 TCF, LiTaO₃ 必须做的很薄,并且支撑衬底的选择也很关键。

1.2 设计方案

1.2.1 复合片温补方案

采用复合片(钽酸锂单晶薄膜——42°Y-X LT (20 μm)/Si(0.4 mm)),其基本性能与钽酸锂单晶基片接近,最大优点在于温度系数优于单晶。

1.2.2 SiO₂ 薄膜温补方案

首先,建立 SiO₂/IDT/LiTaO₃ 以及 IDT/SiO₂/LiTaO₃ 多层声子微结构 SAWF 频率温度系数仿真模型。通过该模型,我们计算了相应结构的相速度、机电耦合系数、衰减、有效介电常数及 TCF。通过分析计算结果,舍弃了 IDT/SiO₂/LiTaO₃ 方案而采用 SiO₂/IDT/LiTaO₃。因为舍弃的方案在要求 SiO₂ 下机电耦合系数过小,不能满足该项目要求。采用 SiO₂/IDT/LT 结构,因加入了很厚的 SiO₂ 薄膜,传统设计方法将不在适用。此外,利用模型的计

算结果,我们预测了 SiO₂ 厚度变化,为以后的研究工作提供了数据依据。

其次,建立了 COM 参数提取平台,设计上采用实验提取方式获得 COM 参数,然后采用阻抗元设计方案。因为在晶片上生长 SiO₂ 薄膜后,原有的结构仿真参数都变了。对原有平台进行改进,利用提取的 COM 参数实现器件仿真。通过试验,验证了 COM 参数提取的可行性。

1.2.3 SAWF IDT 结构

IDT 拓扑结构与常规低损耗 SAW 滤波器一致,采用 5IDT+C+IE 混合结构。

1.2.4 衬底材料

本研究要实现的是高温稳定性的 SAWF 器件,因此我们拟选定 42° Y-X LiTaO₃ 基片作为衬底材料,其 SAW 速率为 4 212 m/s,机电耦合系数为 4.8%,频率温度系数为 -36×10⁻⁶/°C。

2 多层微结构声表面波温补滤波器仿真

本研究中采用的多层结构图 2 所示。在 LiTaO₃ 晶体基片上制作 IDT 结构,然后再在其上面生长一层 SiO₂ 薄膜,通过控制 SiO₂ 薄膜厚度来调节 TCF,从而达到温度补偿的目的,提高 SAW 器件的温度稳定性。基于本项目的吉赫兹工作频率,该结构的几何尺寸均在微米或亚微米量级,是一种典型的微结构 SAWF。

2.1 多层膜微结构 COM 参数提取

多层膜微结构 COM 参数提取是 SAWF 温度补偿仿真的原始基础数据,是 SAWF 设计的关键基础,具有重要意义。为满足本项目的要求,仿真了 SAWF TCF 的计算评估软件,以计算出不同的 SiO₂ 下的 TCF 变化趋势。图 3 为 TCF 的模拟曲线。图中, h/λ 为 SiO₂ 的膜厚波长比变化。由图可见,膜厚为 0 时, τ_f = -32 × 10⁻⁶/°C; h/λ ≈ 0.32 时, τ_f ≈ 0。当器件变为多层结构后,参数提取技术和设计技术变得更复杂,实际参数还需要根据实际

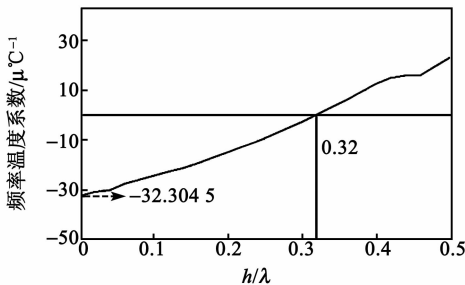


图 3 频率温度系数模拟曲线

制作器件测得的曲线进行拟合。要提取 COM 参数,首先要有计算器件色散曲线的模型。色散曲线的计算模型基于有限元模型分析法:有限元单元网格选择(见图 4);划分网格(见图 5);基片/栅阵/SiO₂ 有限元布局,如图 6 所示。

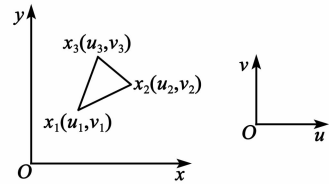


图 4 有限元单元

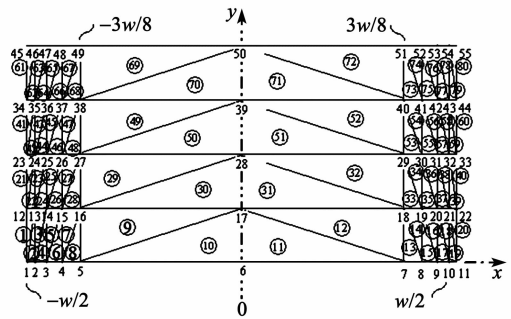


图 5 网格节点单元编号

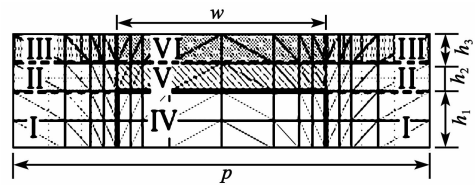


图 6 6 个部分有限元分布

其他部分可根据要求来选择。

SiO₂/IDT/基片: I/II/III/IV/V/VI = SiO₂/SiO₂/空气/指条/SiO₂/SiO₂。

IDT/基片: I/II/III/IV/V/VI = 空气/空气/空气/指条/空气/空气。

通过设计 SAW 单端谐振器、滤波器等进行多层膜结构工艺流片,提取多层膜结构 COM 参数如表 1 所示。包括以下几种过层膜结构: SiO₂/3% Al IDT/42LT, SiO₂: 0.2λ; SiO₂/5% Al IDT/42LT, SiO₂: 0.2λ; SiO₂/2% Cu IDT/42LT, SiO₂: 0.2λ。

表 1 多层膜结构 COM 参数

结构	COM 参数
SiO ₂ /3% Al IDT/42LT	coef=1.1909 262 645 068 235 00 eta=0.332 853 529 199 600 650 epsilon=0.083 483 423 197 122 264 alpha=0.005 384 490 000 000 000
SiO ₂ : 0.2λ	ak2=0.072 314 253 014 773 525

续表

结构	COM 参数
SiO ₂ / 5%Al IDT / 42LT SiO ₂ :0.2λ	coef=1.298 461 555 176 686 500 eta=0.339 203 107 313 591 160 epsilon=0.131 248 520 884 160 450 alpha=0.010 416 480 000 000 001 ak2=0.058 601 238 944 299 111
SiO ₂ / 2%CuIDT / 42LT, SiO ₂ :0.2λ	c=1.171 191 894 727 369 400 eta=0.342 751 784 619 719 110 epsilon=0.134 654 060 208 747 260 alpha=0.033 652 500 000 000 002 ak2=0.105 805 059 005 793 930

2.2 IDT 拓扑结构

本研究的 SAWF 是一种低插损 SAWF,设计采用中心耦合(IIC)换能器结构。图 7 为一个中心耦合双通道低损耗滤波器。该结构有 2 个通道,每个通道有 3 个 IDT、2 个反射器及其之间的间隔(传输线)等 9 个单元模块组成。中心换能器进行通道之间的耦合。

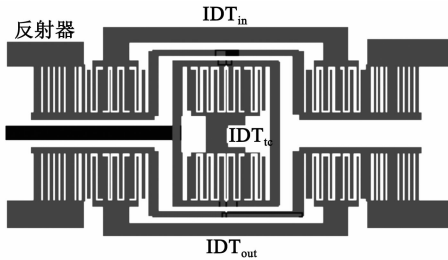


图 7 SAWF IDT 拓扑结构

2.3 多层膜微结构声表面波温补滤波器仿真

基于上述 COM 参数和 ADS 平台,建立了 SAWF 温补器件的 ADS 模型,利用该模型实现了高温稳定性 SAWF 仿真及设计。

2.4 多层膜微结构声表面波温补滤波器仿真性能

复合片方案 SAWF 仿真性能,如图 8 所示。薄膜片方案 SAWF 仿真性能,如图 9 所示。

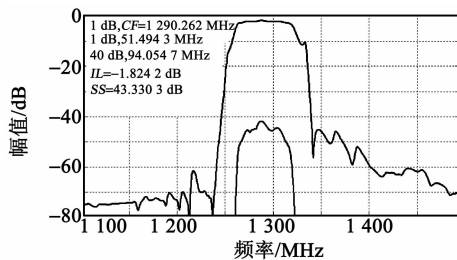


图 8 复合片 TC-SAWF 仿真响应曲线

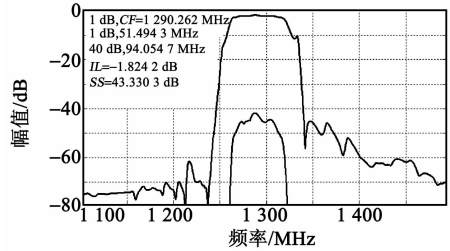


图 9 薄膜片 TC-SAWF 仿真响应曲线

3 实验结果

3.1 复合结构温度补偿性能测试

25 °C 下典型曲线如图 10 所示。测试了 -55 ~ +85 °C (每隔 20 °C 测一个点,保温 0.5 h),得到以下的频率与温度关系拟合曲线(含 TCF 计算值),如图 11 所示。在 -55 ~ +85 °C,复合结构 SAWF 的 TCF 实测计算值: $-24.3 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ 。

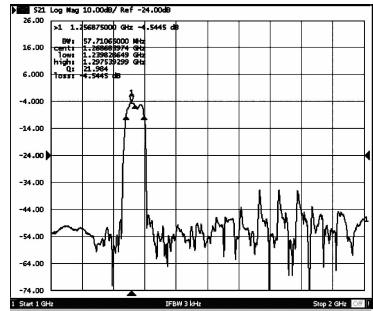


图 10 复合片 TC-SAWF 实测曲线

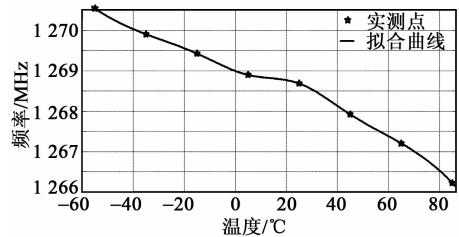


图 11 复合片 TC-SAWF 温度试验

3.2 薄膜结构温度补偿性能测试

图 12 为薄膜结构 SAWF 在 25 °C 下典型频响曲线;测试了 -55 ~ +85 °C (每隔 20 °C 测一个点,保温 0.5 h),得到以下的频率与温度关系拟合曲线如图 13 所示,其计算 $\tau_f < -10 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ 。

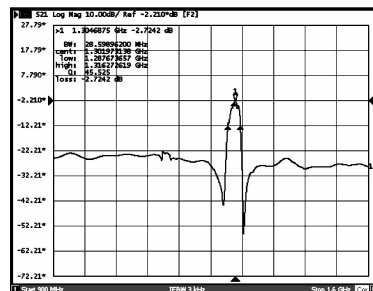


图 12 薄膜结构 TC-SAWF 25 °C 响应曲线

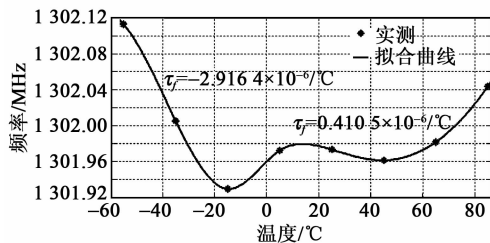


图 13 TC-SAW 频率与温度关系曲线

4 结束语

本文探讨了多层微结构声表面波温补滤波器仿真设计的关键技术:TCF 计算平台建模、COM 理论提取建模、SiO₂ 膜厚度控制以及优化、多层结构的界面波 SAW 设计与仿真及实验验证。突破了如下关键技术:复合片 TC-SAW 样品,频率温度系数

达 $-24.3 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$, 较原片改善 $10 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$; SiO₂ 薄膜 TC-SAW 样品,频率温度系数小于 $-10 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$, 较原片改善 $24 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 以上。下一步工作应提高 COM 参数的精确性,在优化频率温度系数时减小了器件插入损耗。

参考文献:

- [1] MORGAN D. Surface acoustic wave filters with applications to electronic communications and signal processing[M]. UK: Academic Press, 2007.
- [2] CAMPBELL C K. Surface acoustic wave devices for mobile and wireless communications[M]. UK: Academic Press, 1998.
- [3] HASHIMOTO K Y. Surface acoustic wave devices in telecommunications modelling and simulation[M]. Berlin: Springer, 2000.
- [4] 曹亮. 我国声表面波技术和产业的发展[J]. 声学技术, 2013, 32(6): 9-12.
- CAO Liang. The development of surface acoustic wave technology and industry in China[J]. Technical Acoustics, 2013, 32(6): 9-12.
- [5] 赵博. 基于 SAW 原理的传感器技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006.
- [6] SCHOLL G, KORDEN C, RIHA E, et al. SAW-based radio sensor systems for short-range applications[J]. IEEE Microwave Magazine, 2003, 4(4): 68-76.
- [7] 陈秋月. 基于无源无线声表面波传感器的主轴温度监测系统研究与应用[D]. 浙江: 浙江大学, 2016.
- [8] 吴展翔, 刘文, 卢小荣. 声表面波温度传感器的仿真与设计[J]. 压电与声光, 2014, 36(1): 8-11.
- WU Zhanxiang, LIU Wen, LU Xiaorong. Simulation and design of SAW temperature sensor[J]. Piezoelectrics & Acousto-optics, 2014, 36(1): 8-11.
- [9] WEN Changbao, ZHU Changchun, LIU Junhua, et al. Delay time compensation for surface acoustic wave's wavelet transform array device[J]. Chinese Journal of Scientific Instruments, 2006, 27(10): 1173-1177.
- [10] 毛青春, 徐分亮. 窗函数及其应用[J]. 中国水运, 2007, 7(2): 230-232.
- [11] 周磊. 基于变迹加权设计的声表面波温度传感器的构建和研究[D]. 天津: 天津理工大学, 2015.
- [12] 叶韬. 无线无源声表面波传感器射频收发及信号处理系统研究[D]. 浙江: 浙江大学, 2015.
- [13] MARSHALL F G, PAIGE E G S. Novel acoustic surface wave directional coupler with diverse applications[J]. Electronics Letters, 1971, 7(16): 460-462.
- [14] MARSHALL F G, NEWTON C O, PAIGE E G S. Theory and design of the surface acoustic wave multistrip coupler[J]. IEEE Transactions on Sonics and Ultrasonics, 1973, 21(4): 206-215.
- [15] MARSHALL F G, NEWTON C O, PAIGE E G S. Surface acoustic wave multistrip components and their applications[J]. IEEE Transactions on Sonics and Ultrasonics, 1973, 21(4): 126-225.
- [16] 文常保, 巨永锋, 康迺, 等. 基于 MSC 双声路 SAW 器件的设计仿真平台[J]. 器件与技术, 2011, 48(1): 15-20.
- [17] 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.

(上接第 407 页)