

# 低频率漂移极窄带声表面波滤波器

李桦林,詹雪奎,伍平,陈彦光,董加和,马晋毅

(中国电子科技集团公司第二十六研究所,重庆 400060)

**摘要:**保密通信系统对极窄带宽声表面波滤波器需求迫切,由于声表面波滤波器属于温度敏感型器件,在极端恶劣环境温度下器件滤波频率会发生较大漂移,无法保证有用信号提取和近端噪声抑制。为满足射频系统全温应用要求,对基于石英衬底的极窄带声表面波滤波器的频率温度特性进行仿真分析,研究了电极金属膜厚和电极金属化率对器件二阶温度特性拐点的影响,并通过声表面波滤波器结构参数优化,研制出低频率漂移的极窄带声表面波滤波器。

**关键词:**声表面波滤波器;极窄带宽;频率漂移

**中图分类号:**TN65 **文献标识码:**A

## Extremely Narrow Bandwidth Surface Acoustic Wave Filter with Low Frequency Drift

LI Hualin, ZHAN Xuekui, WU Ping, CHEN Yanguang, DONG Jiahe, MA Jinyi

(The 26th Institute of China Electronic Technology Group Corporation, Chongqing 400060, China)

**Abstract:** Surface acoustic wave filters with extremely narrow bandwidth are urgently needed for use in security communication systems. The working frequency of the surface acoustic wave filter will drift significantly at extremely high or low ambient temperatures, which makes it hard for the filter to effectively extract useful signals and suppress noise in the near-passband. This study simulated and analyzed the frequency-temperature characteristics of extremely narrow bandwidth surface acoustic wave filter based on a quartz substrate and studied the effects of metal thickness and the metallization ratio of electrodes on the inflection point of the second order temperature characteristic of the device. An extremely narrow bandwidth surface acoustic wave filter with low frequency drift was finally manufactured by optimizing the structural parameters.

**Key words:** surface acoustic wave filter; extremely narrow bandwidth; frequency drift

### 0 引言

近年来,由于移动通信快速发展,高端武器装备走向小型化和轻量化。声表面波(SAW)滤波器作为射频系统中实现通带滤波、提高信号纯度的关键元器件,被广泛应用于民用移动通讯及雷达、导航、电子对抗等武器装备。随着现代通信系统不断发展,各种电磁环境日趋复杂,频谱资源日益紧张。在有限的频谱资源下,信号频域越发拥挤,使得装备系统之间产生串扰的可能性大大提高。在保密通信电台中存在一些极其重要的基础点频信号和指令信号需要接收,这些信号的频谱被设置得尽可能窄以降低电磁干扰。在机电耦合系数较小的压

电材料上制作单向单相换能器结构、横向耦合谐振型结构或纵向耦合谐振结构的 SAW 滤波器,能够实现 $\leq 1\%$ 的相对带宽,满足系统极窄通带滤波的需求<sup>[1-3]</sup>。

声表面波滤波器利用压电材料的压电效应,通过叉指换能器结构实现声表面波的激励和接收。而压电材料在不同环境温度下具有不同的材料特性,导致滤波器的工作频率在温度变化时产生漂移。对于带宽极窄的 SAW 滤波器,在温度变化下的频率漂移对有效带宽和抑制等性能影响更加明显。

目前声表面波滤波器常用的压电材料主要有石英、钽酸锂、铌酸锂等,不同压电材料的频率温度

收稿日期:2024-11-27

作者简介:李桦林(1992-),男,重庆市人,高级工程师,硕士。

特性存在较大差异。其中,钽酸锂和铌酸锂频率温度系数较大,全温下频率的相对漂移量均大于3%,难以满足装备对于极窄带(相对带宽 $\leq 1\%$ )SAW滤波器的频率稳定性的要求。石英的温度稳定性优于钽酸锂和铌酸锂,其一阶温度系数为0,常用于制作极窄带SAW滤波器<sup>[2-5]</sup>。但由于石英材料具有二阶温度系数,使滤波器频率随温度变化的曲线呈抛物线性。抛物线曲线的拐点处温度决定了器件在全温下的频率漂移量,合适的拐点温度是实现低温漂极窄带SAW滤波器的关键。

因此,为降低极窄带滤波器的全温频率漂移量,满足极窄带声表面波滤波器在温度变化下的应用需求,本文对AT切向石英衬底的SAW器件的频率温度系数进行数值计算,研究了相对金属膜厚和指条金属化比对频率温度系数的影响,并进行低温漂的结构参数优化设计,最终研制出全温范围(-55~85℃)低频率漂移的S波段极窄带SAW滤波器。

## 1 压电本构方程

在压电材料中,应变和电场之间存在耦合,本构方程如下:

$$T_{ij} = c_{ijkl}^E S_{kl} - e_{kij} E_k \quad (1)$$

$$D_i = e_{ikl} S_{kl} + \epsilon_{ik}^S E_k \quad (2)$$

式中: $S_{kl}$ 和 $T_{ij}$ 分别表示应变和应力; $E_k$ 和 $D_i$ 分别表示电场和电位移场; $c_{ijkl}$ 为弹性常数; $\epsilon_{ik}$ 为介电常数; $e_{kij}$ 为压电常数。

为研究器件在不同温度下的频率漂移,计算器件的温度系数,需在普通压电方程中加入温度偏场下的热应力 $T_i^0$ 和热应变 $S_{kl}^0$ 。在温度偏场下的压电本构方程如下:

$$(T_{ij} - T_{ij}^0) = c_{ijkl}^E(T)(S_{kl} - S_{kl}^0) - e_{kij}(T)E_k \quad (3)$$

$$D_i = e_{ikl}(T)(S_{kl} - S_{kl}^0) + \epsilon_{ik}^S(T)E_k \quad (4)$$

$$T_{ij}^0 = c_{ijkl}(T)S_{kl}^0 \quad (5)$$

$$S_{kl}^0 = \alpha_{kl}(T)(T - T_0) \quad (6)$$

同时考虑石英材料参数的非线性温度特性,有:

$$c_{ijkl}(T) = c_{ijkl}(T_0) \sum_{n=0}^N c_{ijkl}^{(n)}(T - T_0) \quad (7)$$

$$\epsilon_{ik}(T) = \epsilon_{ik}(T_0) \sum_{n=0}^N \epsilon_{ik}^{(n)}(T - T_0) \quad (8)$$

$$e_{ijk}(T) = e_{ijk}(T_0) \sum_{n=0}^N e_{ijk}^{(n)}(T - T_0) \quad (9)$$

$$\alpha_{ik}(T) = \alpha_{ik}(T_0) \sum_{n=0}^N \alpha_{ik}^{(n)}(T - T_0) \quad (10)$$

式中: $T$ 为环境温度; $T_0$ 为参考温度25℃; $c_{ijkl}(T)$ 为弹性常数; $\epsilon_{ik}(T)$ 为介电常数; $e_{ijk}(T)$ 为压电常数; $\alpha_{ik}(T)$ 为热膨胀系数。

## 2 低温漂设计

为实现极窄带SAW滤波器全温频率漂移的理论仿真,建立了厚度为 $8\lambda$ (其中 $\lambda$ 为声波波长)的AT石英和厚度为 $4\lambda$ 完美匹配层的半周期有限元模型,如图1所示。在模型中加入材料高低温的温度特性及材料的热膨胀系数<sup>[6]</sup>,使有限元模型能够实现温度场仿真分析,计算-55~85℃温度范围内器件的特征频率变化情况。

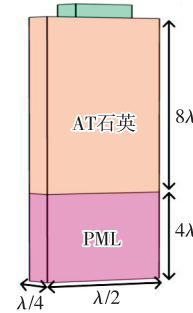


图1 频率-温度行为的半波长有限元模型

### 2.1 膜厚的影响

对电极膜厚为 $0.01\lambda \sim 0.04\lambda$ 、金属化比为0.5的SAW器件进行频率-温度特性仿真。以器件拐点温度的频率作为基准,器件频率的相对变化量与温度的关系如图2-3所示。由图可见,随着金属膜厚增加,器件频率拐点处的温度向低温方向移动。当器件金属膜厚为 $0.016\lambda$ 时,拐点温度正好处于温度区间的中心位置,此时SAW滤波器的频率相对变化量为 $200 \times 10^{-6}$ 。

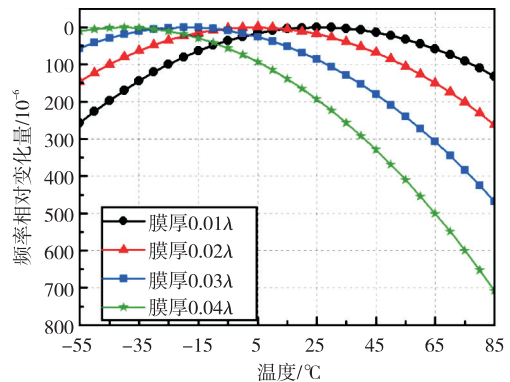


图2 不同膜厚的器件频率-温度特性

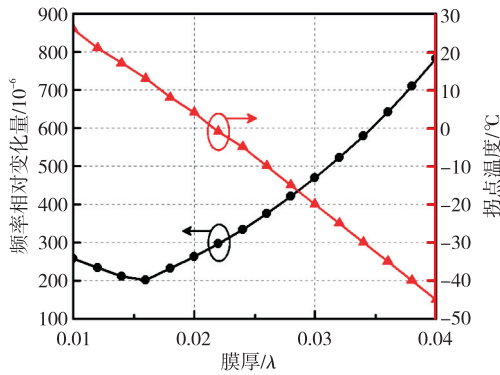


图3 器件拐点温度和膜厚的关系

### 2.2 金属化比的影响

在不同金属化比下,电极膜厚为  $0.02\lambda$  的 SAW 器件的频率-温度特性仿真如图 4 所示。在 SAW 滤波器金属化比增加时,器件频率拐点处温度逐渐向低温方向移动。

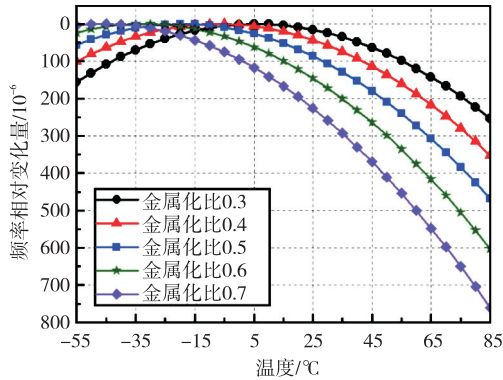


图4 不同金属化比的器件频率-温度特性

### 2.3 结构参数设计

根据仿真结果,拐点温度和电极膜厚、金属化比强相关。利用有限元模型进一步仿真了膜厚为  $0.01\lambda \sim 0.03\lambda$ 、金属化比为  $0.3 \sim 0.7$  的器件拐点温度,如图 5 所示。为了实现更小的频率漂移,设计滤波器时需优选金属膜厚和金属化比,将拐点温度控制在  $10^\circ\text{C}$  左右。

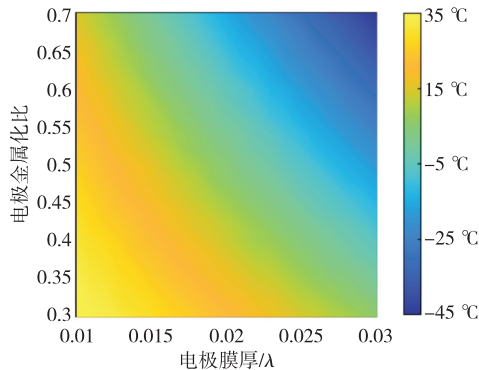


图5 器件拐点温度和结构参数对应关系

## 3 实验

根据工艺制作难度和前期极窄带声表面波滤波器研制情况,以膜厚为  $50\text{ nm}$  的铝电极、金属化比为  $0.5$  的结构参数设计了低温漂的极窄带声表面波滤波器并进行了测试,结果如图 6 所示。由图可见,滤波器的中心频率为  $2101.7\text{ MHz}$ ,插入损耗为  $8.09\text{ dB}$ ,  $-1\text{ dB}$  带宽为  $1.157\text{ MHz}$ ,  $-1\text{ dB}$  相对带宽为  $0.55\%$ 。

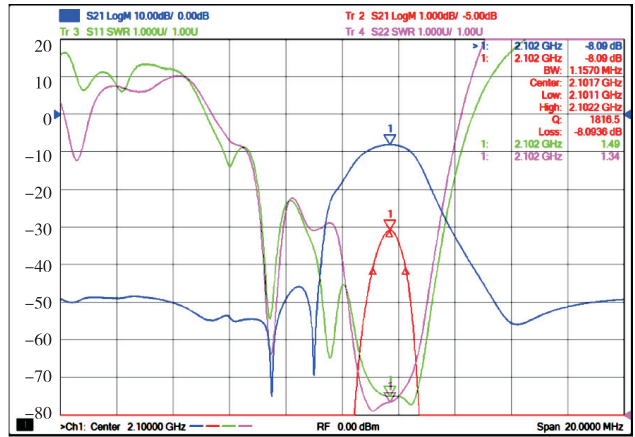


图6 极窄带声表面波滤波器实验频响图

对滤波器进行频率-温度响应测试,温度范围为  $-55 \sim 85^\circ\text{C}$ ,间隔为  $20^\circ\text{C}$ 。在不同温度下,滤波器的通带响应和频率变化如图 7-8 所示。

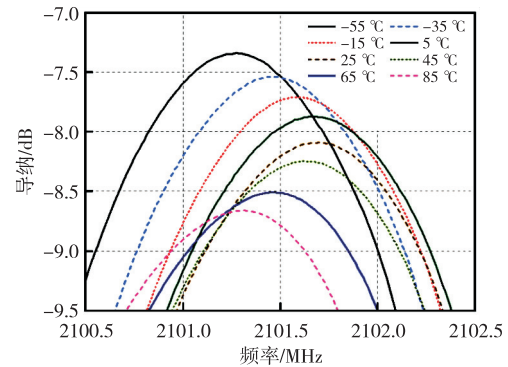


图7 不同温度下器件的通带响应

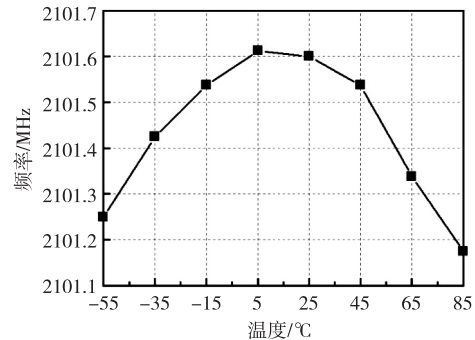


图8 不同温度下器件的频率

由图8可看出,温度为 $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,滤波器的频率为 $2\ 101.25\text{ MHz}$ ;随着温度升高,滤波器频率逐渐向高频移动,在 $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时达到最高 $2\ 101.61\text{ MHz}$ ;温度高于 $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,滤波器频率开始随温度升高而降低;温度为 $85\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,滤波器频率为 $2\ 101.18\text{ MHz}$ 。根据测试结果,滤波器在全温下频率变化量为 $430\text{ kHz}$ ,频率相对变化量约为 $204\times 10^{-6}$ 。

#### 4 结束语

针对基于AT切石英衬底材料的极窄带SAW滤波器,本文系统性地仿真分析了金属膜厚和金属占空比对其频率温度特性的影响,为低频率漂移极窄带声表面波滤波器的制备提供了参考。所研制的频率为 $2\ 101.7\text{ MHz}$ 、 $-1\text{ dB}$ 相对带宽为 $0.55\%$ 的S波段极窄带声表面波滤波器,全温范围的频率变化量约为 $204\times 10^{-6}$ ,满足保密通信系统对极窄带滤波器在全温环境下低频率漂移的要求,对系统实现高抗干扰、高灵敏度的重要指令信号传输具有重要意义。

#### 参考文献:

- [1] 张显洪,王松. 单向单相分布式声反射结构的声表面波滤波器[J]. 压电与声光, 2009, 31(3): 309-311.  
ZHANG Xianhong, WANG Song. Single phase unidirectional DART structure SAW filter[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2009, 31(3): 309-311.
- [2] 赵雪梅,郑泽渔,董加和,等. 基于一种改进型DMS结构的极窄带SAW滤波器[J]. 压电与声光, 2022, 44(2): 253-255.  
ZHAO Xuemei, ZHENG Zeyu, DONG Jiahe, et al. Extreme narrow band SAW filter with an improved DMS structure[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2022, 44(2): 253-255.
- [3] 张显洪,杨卫东,肖强,等. 一种横向耦合改进型结构极窄带声表面波滤波器研究[J]. 压电与声光, 2024, 46(3): 306-309.  
ZHANG Xianhong, YANG Weidong, XIAO Qiang, et al. Study on ultra-narrow band surface acoustic wave filter with improved transversely coupled structure[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2024, 46(3): 306-309.
- [4] 周卫. GHz石英基片声表面横波谐振器和谐振滤波器[J]. 压电与声光, 2018, 40(2): 192-194.  
ZHOU Wei. GHz surface transverse wave resonators and resonance filters on quartz substrate[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2018, 40(2): 192-194.
- [5] 吕翼,廖书丹,陆川,等. 高频高阻带抑制极窄带声表面波滤波器[J]. 压电与声光, 2021, 43(6): 743.  
LYU Yi, LIAO Shudan, LU Chuan, et al. Extremely narrow-band surface acoustic wave filter with high frequency and high out-of-band rejection[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2021, 43(6): 743.
- [6] YONG Y K, KANNA S. IDT geometry and crystal cut effects on the frequency-temperature curves of a SAW periodic structure of quartz[C]//Sendai, Japan: 1998 IEEE Ultrasonics Symposium Proceedings, 1998: 223-228.