

# 一种横向耦合改进型结构极窄带声表面波滤波器研究

张显洪,杨卫东,肖强,蒋道军,张晟,施建峰

(中国电子科技集团公司第二十六研究所,重庆 400060)

**摘要:**该文采用波导法分析了横向耦合极窄带声表面波滤波器速度变化模式,并用多物理场 COMSOL 软件对横向耦合声表面波滤波器的中心耦合条结构和耦合距离的变化建模进行计算,并分析频响特性。采用石英晶体作为底衬,设计了频率为 898.144 MHz,插入损耗约为 6 dB 的极窄带声表面波滤波器并进行验证。结果表明,中心耦合条开腔结构的声表面波滤波器的相对带宽达到 7.2%,与不开腔结构 5.2% 相对带宽相比,提升了 2%。这说明横向耦合声表面波滤波器的中心耦合条结构变化,能改变极窄带声表面波滤波器的相对带宽。

**关键词:**横向耦合;极窄带;声表面波滤波器;物理场 COMSOL 软件;相对带宽

**中图分类号:**TN65 **文献标识码:**A

## Study on Ultra-Narrow Band Surface Acoustic Wave Filter with Improved Transversely Coupled Structure

ZHANG Xianhong, YANG Weidong, XIAO Qiang, JIANG Daojun, ZHANG Sheng, SHI Jianfeng

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

**Abstract:** In this study, the velocity change mode of a transversely coupled ultra-narrow band surface acoustic wave filter is analyzed using the waveguide method. The changes in the central coupling strip structure and coupling distance of the transversely coupled surface acoustic wave filter are modeled and calculated using the multi-physics COMSOL software, and the frequency response characteristics are analyzed. An ultra-narrow band SAW filter with frequency of 898.144 MHz and insertion loss of 6 dB has been designed and verified. The results show that the fractional bandwidth of surface acoustic wave filter using the center coupled bar with an open cavity reaches 7.2%, which is 2% higher than that of the non-open cavity structure of 5.2%. This indicates that the change of the center coupled bar structure of a transversely coupled surface acoustic wave filter can change the fractional bandwidth of ultra-narrow band surface acoustic wave filters.

**Key words:** lateral coupled; ultra-narrow band; SAW filter; multi-physics COMSOL software; fractional bandwidth

### 0 引言

近年来,虽然我国北斗导航系统日趋完善,但北斗导航终端接收机中存在镜像信息、谐波、发射泄漏、各类寄生杂波等多种干扰信号,若不滤除,系统将难以正常工作。因此,导航终端接收机中必须采用极窄带滤波器进行频谱净化,而北斗导航系统对窄带滤波器的带宽、滤波特性及可靠性的要求很高。在众多滤波器中,极窄带声表面波滤波器在体积、一致性、可靠性及工艺保障性方面具有优选性,能满足系统接收机对极窄带声表面波滤波器可靠

性和性能的需求,并已在导航系统中大量使用。

极窄带声表面波滤波器的设计一般采用横向耦合技术(简称 TCF),此结构设计的声表面波滤波器采用石英晶体作为底衬,设计的器件具有相对带宽值小(约为 0.5%<sup>[1]</sup>)、插损小、阻带抑制较好及体积小特点,故而横向耦合声表面波滤波器适用于终端接收机系统的中频滤波和抑制杂波。但某工程在 P 波段又需要相对带宽在 0.7%~0.8% 的极窄带声表面波滤波器,若采用传统结构 TCF 来满足带宽,虽然可以调节耦合距离和换能器孔径大

收稿日期:2023-12-22

基金项目:国家重大预研项目(31512030307,31512030304)

作者简介:张显洪(1966-),男,重庆市秀山区人,高级工程师,硕士。

小,但其插入损耗将变大,会产生各种寄生效应,且考虑其温度特性,难以满足系统接收机的要求<sup>[2]</sup>。因此,本文在传统结构 TCF 基础上提出了一种改进型结构,它能保证在插入损耗不变的情况下提升相对带宽,以满足系统接收机对各项性能指标的需求。

### 1 横向耦合声表面波滤波器分析

横向耦合声表面波滤波器结构如图 1 所示。图中,  $W$  为叉指换能器的孔径,  $B$  为汇流条的宽度,  $G$  为中心耦合条的宽度,  $g$  为上下换能器的耦合距离。此结构结合了波导和谐振的原理,可实现带通滤波器的功能。

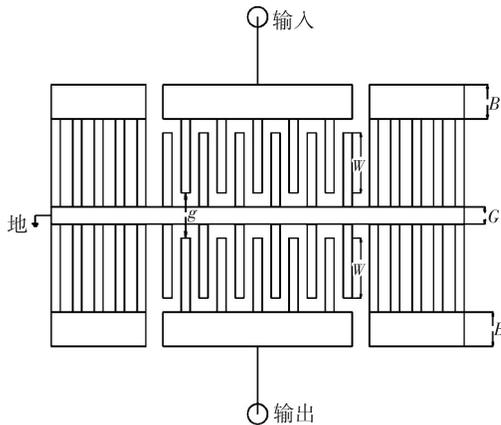


图1 横向耦合声表滤波器结构示意图

按照图 1 所示连接输入、输出和地,将会在垂直于波传播的方向上耦合出一阶模和二阶模,即对称模和反对称模,如图 2 所示。图中,  $\Phi_s(f_s)$  表示横向耦合对称模,  $\Phi_a(f_a)$  表示横向耦合反对称模。一般采用波导法分析横向耦合结构,将波导分为 7 个区。1 区、7 区表示自由表面。2 区、6 区表示汇流条,3 区、5 区表示电极,4 区表示中心耦合接地条。此波导和平面波速度分布如图 3 所示,图中  $v_1 \sim v_7$  分别表示各个区的速度。

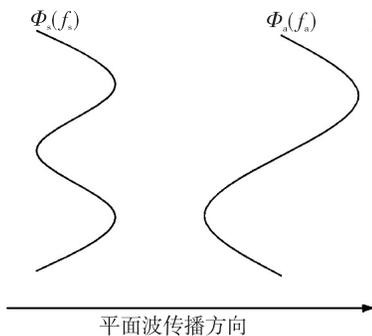


图2 横向耦合的对称模和反对称模

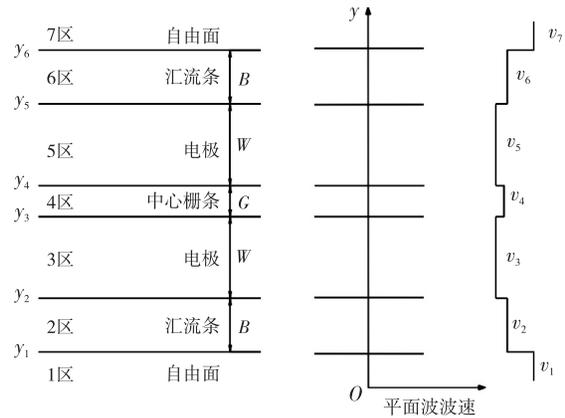


图3 横向耦合滤波器波导图

设计极窄带声表面波滤波器时,一般选用稳定的温度系数和极低的机电耦合系数的石英晶体作为底衬,铝-铜膜(99%左右的铝,1%左右的铜)作为镀膜材料,这样不同的区具有不同的声速。在汇流条区和中心耦合接地条区声速较快,用  $v_f$  表示快区;在电极区声速较慢,用  $v_s$  表示慢区。两个区的速度差值归一化为

$$P_{DV} = (v_f - v_s) / v_s \tag{1}$$

对称模速度  $V_s$  与反对称模速度  $V_a$  的差值归一化为

$$M_{DV} = (V_a - V_s) / V_s \tag{2}$$

对称模频率( $f_s$ )与反对称模频率( $f_a$ )的相对带宽为  $(f_a - f_s) / f_s$ ,其与  $M_{DV}$  呈正比关系,而试验结果  $M_{DV}$  与  $P_{DV}$  相关<sup>[3]</sup>,如图 4 所示。

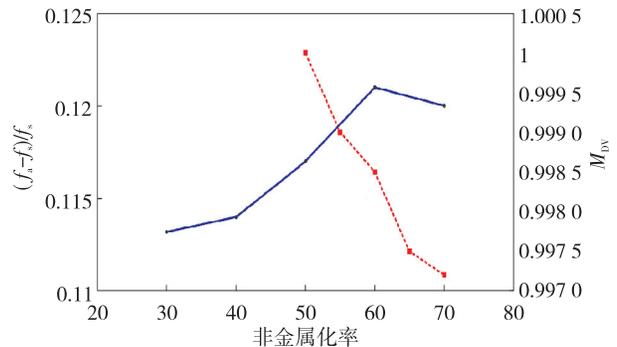


图4 非金属化率与归一化相对频率及相对速度的关系

### 2 横向耦合声表面波滤波器频响特性的模拟计算

基于多物理场 COMSOL 有限元软件<sup>[4]</sup>,研究了图 1 中变换耦合距离  $g$  和 4 区中心耦合接地条  $G$  实腔与开腔相对带宽的变化。计算了铝膜/(36°-AT 石英晶体)在相对电极厚度(2%),波长为  $3.45 \times 10^{-6}$  m,不同  $g$  条件下的相对带宽的变化情

况,建立的模型如图5所示。

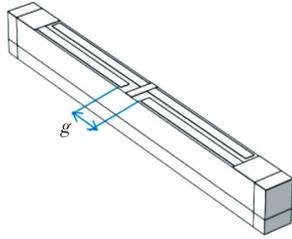


图5 一对指的横向耦合有限元周期性模型

取  $g$  值分别为  $3.45 \times 10^{-6}$  m、 $5.17 \times 10^{-6}$  m、 $6.9 \times 10^{-6}$  m 时,计算相对带宽频响如图6所示。由图可见, $g$  越大,带宽越窄,插入损耗越小。

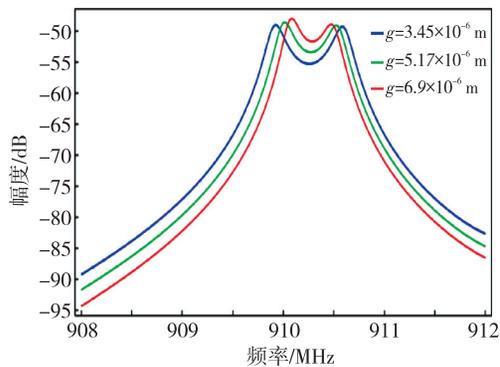


图6 不同  $g$  计算的  $S_{21}$  曲线的频响对比图

计算了中心耦合条  $G$  开腔与不开腔在波长相同、相对膜厚相等的情况下,一对指相对带宽的变化,建立的模型如图7所示。

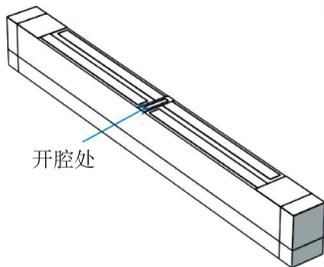


图7 一对指的横向耦合中心耦合条开腔模型

开腔面积大小即非金属化率  $a_p = 0.85$ ,计算相对带宽如图8所示。由图可见,非金属化率越大,带宽越宽,插入损耗几乎不变。

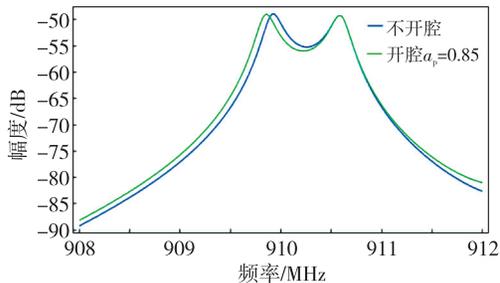


图8 耦合条  $G$  开腔与不开腔频响对比图

### 3 设计实例

为了能够对某系统中 P 波段电路信号中极窄带的混频信号进行提纯滤波,提高信噪比,增加抗干扰能力,本文设计了一种提升极窄带带宽新结构的声表面波滤波器。采用  $36^\circ$ -AT 切型,晶圆基片采用直径  $\varnothing 101.6$  mm、厚度为 0.5 mm 石英晶体材料,在此晶圆上设计制作了中心频率 898.144 MHz,相对带宽约 0.7%,高带外抑制,低旁瓣等高可靠性声表面波滤波器。

此声表面波滤波器由输入、输出横向耦合谐振器和耦合条构成,其输入端、输出端按声波横向耦合传播放置,耦合条置于输入、输出换能器之间,耦合条两端的耦合距离约为 1 个波长。为了提高带外抑制,本结构采用横向耦合声表面波滤波器两级级联<sup>[5]</sup>。设计时采用中心耦合条开腔和不开腔两种方式并进行对比,采用陶瓷表贴封装外壳。图9为其结构示意图。

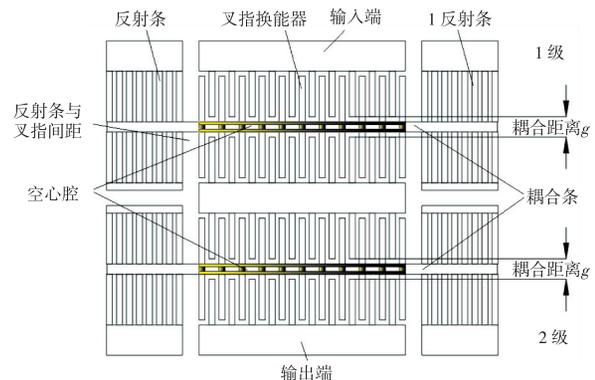


图9 改进型横向耦合声表滤波器结构示意图

按照图9所示建立模型,计算耦合条开腔结构的模拟与实测器件的幅频响应在无外匹配时的对比图如图10所示。

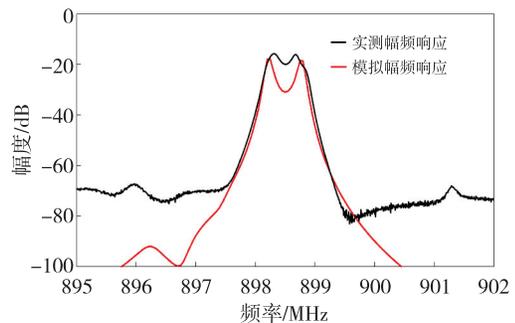


图10 耦合条开腔结构的模拟与实测器件的幅频响应对比图

由图10可见,模拟曲线与实测曲线的相对带宽与过渡带较吻合,但带外抑制存在一定的差异,模拟曲线的带外抑制好于实测曲线,这是因为在模拟

时未考虑外壳、点焊线等寄生响应的电磁效应。由于此模型结构对膜厚敏感,对COM参数的精确提取难度大,所以要做到模拟与实测完全吻合,还需要完善模型的模拟设计,但它对设计横向耦合结构的声表滤波器具有一定的指导作用。

计算耦合条开腔与不开腔的声表滤波器通过串电感、并联电容外匹配后,通带平坦,幅频响应如图11所示。相较于耦合条不开腔横向耦合结构设计的声表面波滤波器,耦合条开腔新型结构的声表滤波器提升了器件频响的2%相对带宽,插入损耗约为6 dB,封装在表贴SMD3030C外壳中。

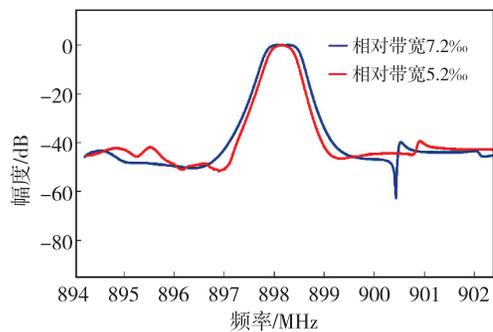


图11 开腔与不开腔幅频响应图对比图

#### 4 结束语

极窄带声表面波滤波器在终端接收机中应用广泛。本文采用波导方法分析了横向耦合声表滤波器相对带宽、相对频率以及相对速度的关系。若想增加相对带宽,则可以减小表面横波在中心金属耦合条中的传播速度;反之,若想减小相对带宽,则可以增加表面横波在中心金属耦合条中的传播速度。在横向耦合声表面波滤波器结构中,采用对横向耦合声表面波滤波器中耦合条开腔的方法来减小金属化率,从而减小表面横波在金属中的传播速度,提升极窄带声表面波滤波器的相对带宽。通过多物理场COMSOL有限元软件建立的模型计算分

析也可得此结论,根据此结构设计的实际器件应用于工程中也能验证此结论。因此,利用多物理场COMSOL有限元软件助力声表面波滤波器设计是可行的。同时,横向耦合声表面波滤波器的中心耦合条结构变化,能改变极窄带声表面波滤波器的相对带宽。

#### 参考文献:

- [1] 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): 743-745.  
LYU Yi, LIAO Shudan, LU Chuan, et al. Extremely narrowband surface acoustic wave filter with high frequency and high out-of-band rejection[J]. *Piezoelectrics & Acoustooptics*, 2021, 43(6): 743-745.
- [2] 童筱钧,钟素娟. 横向耦合谐振滤波器寄生模抑制的研究[J]. 压电与声光, 2011, 33(2): 165-173.  
TONG Xiaojun, ZHONG Sujuan. Investigation of suppressing spurious response of transversal coupling resonator filter [J]. *Piezoelectrics & Acoustooptics*, 2011, 33(2): 165-173.
- [3] TSUTSUMI J, IKATA O, SATOH Y. Transversely coupled resonator filters with 0.1% fractional bandwidth in quartz[C]//[S. l.]: *Ultrasonics Symposium IEEE*, 1996: 65-69.
- [4] 王巍,周杨春,王方,等. 基于COMSOL的声表面波器件二维等效模型设计[J]. 压电与声光, 2021, 43(5): 605-608.  
WANG Wei, ZHOU Yangchun, WANG Fang, et al. Design of two-dimensional equivalent model of surface acoustic wave device based on COMSOL[J]. *Piezoelectrics & Acoustooptics*, 2021, 43(5): 605-608.
- [5] RUSAOV A N, DAI J D, KANSY R J. Design of wide band SAW coupled resonator filters on quartz[C]//[S. l.]: *Ultrasonics 2003 IEEE Symposium on, IEEE*, 2003: 513-517.