

# 超宽带声表面波滤波器的设计

陈景, 韩韬, 吉小军, 唐供宾, 张巧珍

(上海交通大学 仪器科学与工程系, 上海 200240)

**摘要:**该文精确模拟了基于弛豫铁电单晶的声表面波(SAW)梯形滤波器的性能。首先介绍了由谐振器构成的梯形 SAW 滤波器的工作原理,利用 QUCS 软件建立了七阶梯形滤波器的仿真模型。结果表明,该单晶能实现高达 620 MHz 的超宽带 SAW 滤波器(中心频率 1 GHz),比传统压电材料的滤波器带宽高 3 倍;通过优化各支路谐振器的静态电容及传统梯形滤波器的结构,牺牲了一定的带宽,但获得了较高的带外抑制和过渡带的陡峭度;讨论了不同品质因数对滤波器带内插损的影响。

**关键词:**超宽带滤波器;声表面波(SAW);弛豫铁电单晶;机电耦合系数;品质因数

**中图分类号:**TN65;TM22<sup>+</sup>1 **文献标识码:**A

## Design of Ultra-Wideband Surface Acoustic Wave Filters

CHEN Jing, HAN Tao, JI Xiaojun, TANG Gongbin, ZHANG Qiaozhen

(Dept. of Instrument Science and Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

**Abstract:** This paper accurately simulated the properties of ladder-type surface acoustic wave (SAW) filters composed of resonators employing relaxor-based ferroelectric single crystals. Firstly, the working principles of ladder-type SAW filter was introduced, and then a simulation model of seven stepped filter was established by utilizing the quite universal simulator (QUCS). The simulated results showed that an extremely large wideband SAW filter of 620 MHz at 1 GHz could be obtained by utilizing such new single crystals, which is presently three times larger than that of the conventional piezoelectric material; the band rejection and skirt steepness could be improved by adjusting static capacitance ratio and modification of the conventional ladder-type filter, but sacrifices some bandwidth; the influence of quality factor on the insertion loss of SAW filters was discussed finally.

**Key words:** ultra-wideband filter; surface acoustic wave; relaxor based ferroelectric single crystals; coupling factor; quality factor

### 0 引言

声表面波(SAW)滤波器工作在 2 GHz 以下,由于具有合适的带宽(30~60 MHz),插入损耗低(小于 2 dB),带外抑制高(40~50 dB),成本低和小型化等优点,被广泛应用于手机射频前端<sup>[1]</sup>。近年来,新涌现的时分复用技术采用如 Band 41 要求 200 MHz 的带宽,但基于传统材料的滤波器很难满足上述要求<sup>[2]</sup>。SAW 滤波器的带宽主要取决于基片材料的机电耦合系数( $K^2$ ), $K^2$  越大,滤波器的带宽越宽。因此,寻求具有更高的  $K^2$  的新型压电材料,成为提高 SAW 滤波器带宽的最有效途径<sup>[3]</sup>。在商用的传统材料中,YX-15°LiNbO<sub>3</sub> 基片拥有较

高的  $K^2$ ,可达 25%<sup>[4]</sup>,而 K. Yamanouchi 教授曾报道过 YX-KNbO<sub>3</sub> 基片的水平剪切 SAW 的  $K^2$  可达 53%<sup>[5]</sup>。该单晶在生长冷却的过程中,极易发生相变致晶体开裂且形成多畴结构,经过十几年的努力始终未能生长出适合应用的单晶材料。

本文作者首次报道了三元弛豫铁单晶 Pb(In<sub>1/2</sub>Nb<sub>1/2</sub>)O<sub>3</sub>-Pb(Mg<sub>1/3</sub>Nb<sub>2/3</sub>)O<sub>3</sub>-PbTiO<sub>3</sub>(PIN-PMN-PT)的 SAW 性能,即在 YX-PIN-PMN-PT 上存在着很高的  $K^2$  的水平剪切波( $K^2$  最高可达 60%)<sup>[6]</sup>,并率先通过实验制备了基于该单晶的单端谐振器,实测的  $K^2$  为 57.3%<sup>[7]</sup>。这一数值在所有压电材料中最高,使实现超宽带的 SAW 滤波器成为可能。

收稿日期:2015-07-27

基金项目:国家自然科学基金资助项目(11404209);上海自然科学基金资助项目(14ZR1422000);高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20130073120039);教育部留学回国人员启动基金资助项目(教外司留【2014】1685号)

作者简介:陈景(1981-),男,安徽人,讲师,博士,主要从事声表面波(SAW)与薄膜体波(FBAR)器件模拟研究。

## 1 滤波器构成原理

SAW 谐振器通过压电基片上的叉指电极来激发,其电学等效电路如图 1 所示。图 1(a)中, $C_m$  和  $L_m$  分别为压电基片的弹性和惯性引起的动态电容和动态电感, $C_0$  为静态电容, $R_m$  为动态电阻。

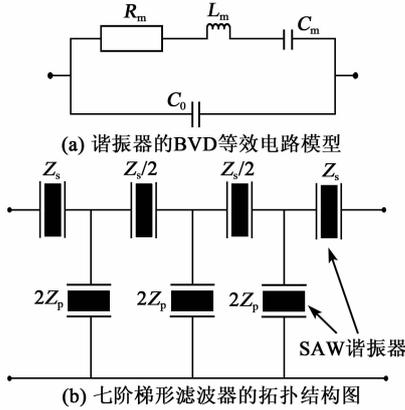


图 1 谐振器的 BVD 等效电路模型和七阶梯形滤波器的拓扑结构图

由 BVD 等效电路可以得到谐振器的谐振和反谐振频率( $\omega_r$  和  $\omega_a$ )分别为

$$\omega_r = \frac{1}{\sqrt{L_m C_m}} \quad (1)$$

$$\omega_a = \frac{1}{\sqrt{L_m C_m C_0 / (C_m + C_0)}} \quad (2)$$

从而计算出谐振器机电耦合系数( $K^2$ )为

$$K^2 = \frac{(\pi\omega_r/2\omega_a)}{\tan(\pi\omega_r/2\omega_a)} \quad (3)$$

谐振频率的品质因数( $Q$ )是半个周期内存储能量与损耗能量之比,定义为

$$Q = \frac{\omega_r L_m}{R_m} = \frac{1}{\omega_r C_m R_m} \quad (4)$$

图 1(b)中, $Z_s$  和  $Z_p$  分别为串、并联支路中的谐振器的阻抗。该滤波器的设计原理:当串联支路中  $Z_s$  的谐振频率  $\omega_{rs}$  和并联支路中  $Z_p$  的反谐振频率  $\omega_{ap}$  相吻合时,构成了滤波器的中心频率( $\omega_c \approx \omega_{rs} \approx \omega_{ap}$ ),而  $\omega_{m1}$  和  $\omega_{m2}$  则构成滤波器的 2 个陷点,从而形成了带通滤波器。

## 2 超宽带滤波器的设计

根据上述原理,我们利用 QUCS 建立了仿真模型,分别模拟了基于 YX-PIN-PMN-PT, YX-KNbO<sub>3</sub> 和 YX-15°LiNbO<sub>3</sub> 基片的通带性能,滤波器的中心频率均为 1 GHz,模型中考虑无损情况, $Q$  值设定足够高(为 1 000),静态电容比  $C_{op}/C_{os}$  初步设定为 0.5,其中, $C_{op}$  和  $C_{os}$  分别表示并联和串联支路的静态电容。仿真结果如图 2 所示。由图可看出,滤波器的带宽主要取决于压电基片的  $K^2$ ,该数值越高,

能实现的滤波器带宽越宽。新型弛豫铁电材料 YX-PIN-PMN-PT 由于具有很高的  $K^2$ ,因而可实现的带宽是传统压电材料 YX-15°LiNbO<sub>3</sub> 的 3 倍,可达 620 MHz。

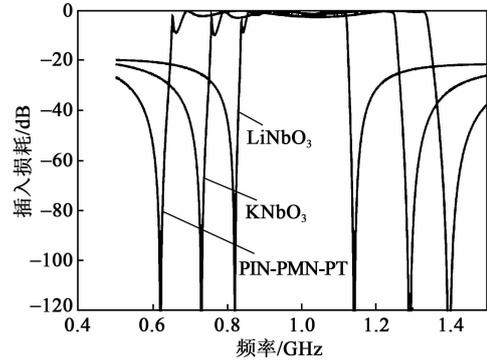


图 2 不同压电材料的频率响应图

同时可知,这些滤波器的带外抑制较低,仅约为 -20 dB,而带外抑制可通过调节两支路的  $C_{op}/C_{os}$  来优化,图 3 为并、串联支路不同  $C_{op}/C_{os}$  的通带性能。当  $C_{op}/C_{os}=3$  时,带外抑制可提高到 -53 dB,但该方法获得的过渡带陡峭度明显降低,且牺牲了一定的带宽。

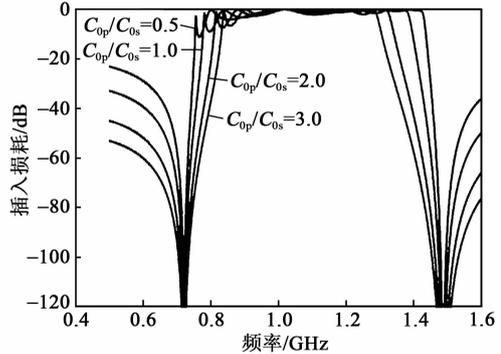


图 3 不同  $C_{op}/C_{os}$  值时的频率响应图

我们采用优化传统梯形滤波器的拓扑结构来进一步优化超宽带 SAW 滤波器的带宽、带外抑制及过渡带的陡峭度。在原有的梯形电路中再加入新的谐振器,使频率响应产生 2 个新的陷点<sup>[9]</sup>。谐振器的加入方法有:

1) 通过在某一并联支路上串联 1 个串联支路的谐振器。

2) 在某一串联支路上并联 1 个并联支路谐振器。

两种方法得到的滤波器性能基本相同,我们采用第 1)种方法,仿真拓扑如图 4(a)所示。在新型结构中引入了控制支路谐振器的阻抗参量  $m$  ( $0 < m \leq 1$ ) (见图 4(b)),通过改变  $m$  来改变支路的阻抗,从而优化滤波器的频率响应<sup>[9]</sup>。图 5 为  $m=1.0, 0.8, 0.6, 0.4$  和  $0.2$  时,滤波器的频率响应,其中

$C_{op}/C_{os}=2.0$ 。  $m$  取值不同,滤波器性能变化为

1) 当  $m=1.0$  时,新的滤波器拓扑图将回归到传统的滤波器结构。

2) 当  $m=0.8$  时,过渡带陡峭度明显提高,带外抑制无明显变化,但牺牲了一定的带宽(从 620 MHz 降至 400 MHz)。

3) 当  $m=0.6$  和  $0.4$  时,过渡带仍很陡峭,带外抑制从  $-40$  dB 提高到  $-60$  dB,而带宽变化不大。

4) 当  $m=0.2$  时,带宽降到约 100 MHz,严重牺牲了带宽,失去了超宽带的优势。

因此可通过选择合适的  $m$  值来改善滤波器的综合性能。

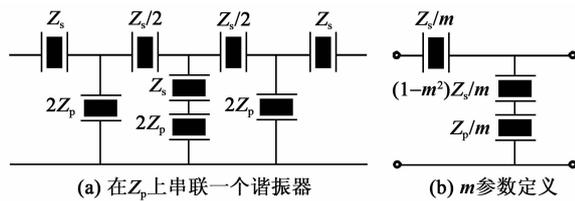


图 4 在  $Z_p$  上串联一个谐振器及  $m$  参数定义

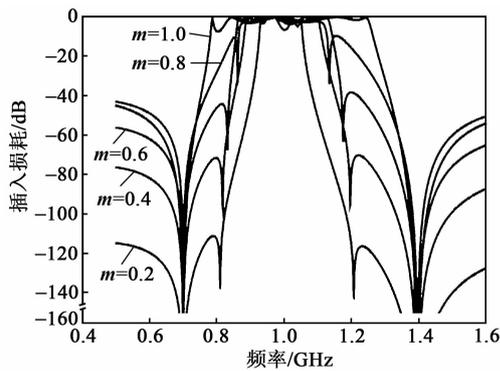


图 5 串联电路图频率响应图

以上滤波器的设计都是在无损传播的情况下,即各支路的  $Q$  值设定较高,达 1 000。但一般具有高  $K^2$  的压电材料, $Q$  值均不高,因此,我们考虑了有损耗的情形。图 6 为新型拓扑结构、最优的  $K^2$  及各支路静态电容比等参数的条件下,滤波器的性能随  $Q$  的变化。

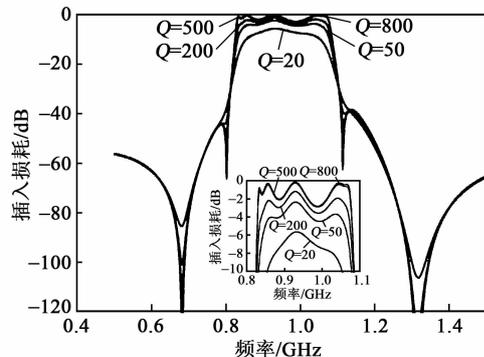


图 6 不同  $Q$  值下的频率响应图

由图 6 可知,当  $Q=800$  和  $500$  时,滤波器的带内插损变化较小;当  $Q$  值下降到  $200$  后,带内插损迅速上升,恶化滤波器的带通性能;当  $Q$  值为  $50$  及  $20$  时,由新串联结构所产生的两个陷点逐渐消失,过渡带的陡峭度下降,带内插损增加到约  $-6$  dB。

### 3 结束语

本文利用 QUCS 建立了 SAW 滤波器的仿真模型,模拟了具有超高  $K^2$  的弛豫铁电单晶的超宽带 SAW 滤波器的性能。设计过程中,通过优化各支路静态电容和采用新型滤波器拓扑结构,获得了超带宽,高带外抑制和过渡带陡峭的通带性能。讨论了有损情况下,品质因数的变化对滤波器带内插入损耗的影响。

### 参考文献:

- [1] 武以立,邓盛刚,王永德. 声表面波原理及其在电子技术中的应用[M]. 北京:国防工业出版社,1983.
- [2] 文继国. 射频声表面波滤波器的研究[D]. 成都:四川电子科技大学,2009.
- [3] HASHIMOTO K, TANAKA S, ESASHI M. Tunable RF SAW/BAW filters: dream or reality? [J]. Proc IEEE Freq Contr Symp, 2011; 965-972.
- [4] HASHIMOTO K, ASANO H, OMORI T, et al. Ultra-wideband surface acoustic wave devices using Cu-grating/rotated-YX-LiNbO<sub>3</sub>-substrate structure[J]. Jpn J of Appl Phys, 2004, 43(5B): 3063-3066.
- [5] YAMANOUCI K, ODAGAWA H, KOJIMA T, et al. Theoretical and experimental study of super high electromechanical coupling surface acoustic wave propagation in KNO<sub>3</sub> single crystal[J]. Electronics Letters, 1997, 33(3): 193-194.
- [6] CHEN Jing, WANG Hualei, HASHIMOTO K, et al. Theoretical analysis of ultrahigh electromechanical coupling surface acoustic wave propagation in PIN-PMN-PT crystals[J]. J Appl Phys, 2011, 109: 1-3.
- [7] CHEN J, LIU J S, HASHIMOTO K, et al. Ultra-wideband surface acoustic wave resonator employing Pb(In<sub>1/2</sub>Nb<sub>1/2</sub>)O<sub>3</sub>-Pb(Mg<sub>1/3</sub>Nb<sub>2/3</sub>)O<sub>3</sub>-PbTiO<sub>3</sub> crystals [J]. Appl Phys Lett, 2012, 100: 1-3.
- [8] KOMATSU T, TANAKA Y, HASHIMOTO K, et al. Design of narrow bandwidth ladder-type filters with sharp transition bands using mutually connected resonator elements[J]. IEEE Trans Ultrason, Ferroelec, and Freq Contr, 2009, 56(7): 1451-1456.
- [9] ZOBEL O J. Theory and design of uniform and composite electric wave-filters[J]. The bell System Technical Journal, 1923, 1(2): 1-46.