

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⁺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^[1]。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^[2]。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^[3]。在商用的传统材料中,YX-15°LiNbO₃ 基片拥有较

高的 K^2 ,可达 25%^[4],而 K. Yamanouchi 教授曾报道过 YX-KNbO₃ 基片的水平剪切 SAW 的 K^2 可达 53%^[5]。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_{1/2}Nb_{1/2})O₃-Pb(Mg_{1/3}Nb_{2/3})O₃-PbTiO₃(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%)^[6],并率先通过实验制备了基于该单晶的端单谐振器,实测的 K^2 为 57.3%^[7]。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。

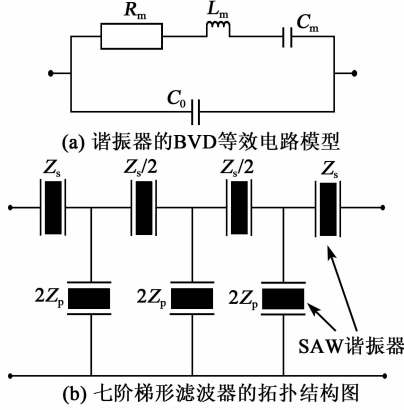


图 1 谐振器的 BVD 等效电路模型和七阶梯形滤波器的拓扑结构图

由 BVD 等效电路可以得到谐振器的谐振和反谐振频率 (ω_r 和 ω_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 ω_{rs} 和并联支路中 Z_p 的反谐振频率 ω_{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 ω_{m1} 和 ω_{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-KNbO₃ 和 YX-15°LiNbO₃ 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°LiNbO₃ 的 3 倍, 可达 620 MHz。

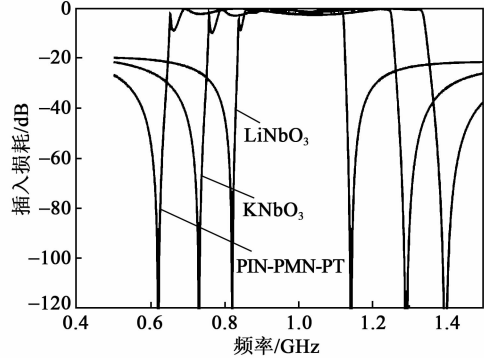


图 2 不同压电材料的频率响应图

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。

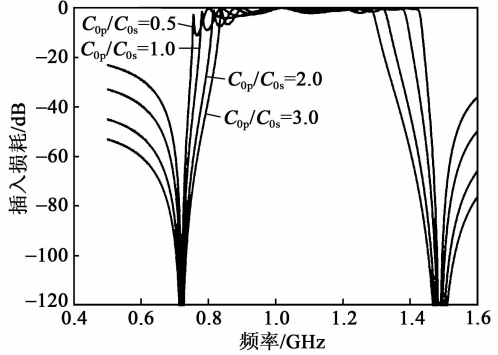


图 3 不同 C_{op}/C_{os} 值时的频率响应图

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^[9]。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^[9]。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。

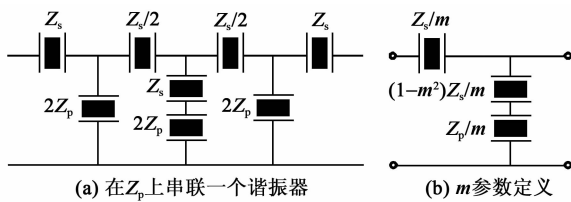


图 4 在 Z_p 上串联一个谐振器及 m 参数定义

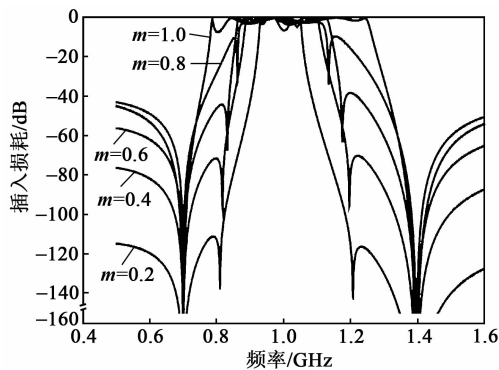


图 5 串联电路图频率响应图

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。

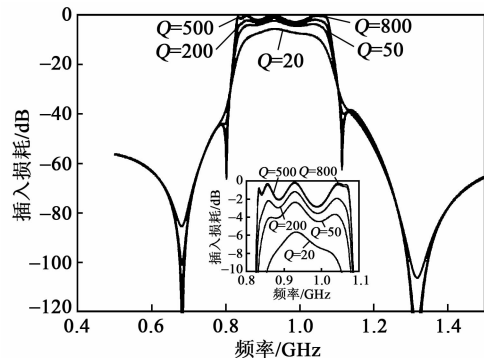


图 6 不同 Q 值下的频率响应图

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,获得了超宽带,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-LiNbO₃-substrate structure[J]. Jpn J of Appl Phys, 2004, 43(5B): 3063-3066.
- [5] YAMANOUCHI K, ODAGAWA H, KOJIMA T, et al. Theoretical and experimental study of super high electromechanical coupling surface acoustic wave propagation in KNO₃ 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_{1/2}Nb_{1/2})O₃-Pb(Mg_{1/3}Nb_{2/3})O₃-PbTiO₃ 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.