

低插损窄带 TCSAW 滤波器的设计与研制

黄亮,周亚男,王志超,何朝峰,朱卫俊

(中电科技德清华莹电子有限公司,江苏南京 210016)

摘要:为了减小窄带滤波器的插入损耗,在梯形拓扑的基础上引入并联电容,提出了一种并联电容型梯形拓扑。利用并联电容大幅度改变反谐振点频率的特点,以牺牲较小插入损耗的代价来缩小带宽。通过谐振器设计与进化算法寻优,成功研制出一款基于 $\text{SiO}_2/\text{Cu}/127^\circ\text{YX-LiNbO}_3$ 结构的低插损窄带温补型声表面波(TCSAW)滤波器。实验结果表明,滤波器的中心频率为 1 514 MHz,相对带宽为 0.46%,带内插入损耗仅 1.45 dB,过渡带 20 MHz 带外抑制滚降到 24 dB,远带带外抑制大于 30 dB,WiFi 频段抑制高达 48 dB,频率温度系数 TCF 为 $-20 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$,器件尺寸为 $1.1 \text{ mm} \times 0.9 \text{ mm}$ 。

关键词:温补型声表面波滤波器;梯形拓扑;并联电容;窄带;低插损

中图分类号:TN65;TN713 **文献标识码:**A

Design and Development of Narrow-Band TCSAW Filter with Low Insertion Loss

HUANG Liang, ZHOU Yanan, WANG Zhichao, HE Chaofeng, ZHU Weijun

(CETC Deqing Huaying Electronics Co., Ltd., Nanjing 210016, China)

Abstract: A shunt-capacitance-type ladder-type topology was proposed by adding a shunt capacitance in a ladder-type topology to further reduce the insertion loss of a narrow-band filter. The shunt capacitance was used to modify the anti-resonant frequency of the resonator for reducing the bandwidth of the filter with sacrificing low insertion loss. A narrow-band temperature compensated SAW (TCSAW) filter with low insertion loss based on a $\text{SiO}_2/\text{Cu}/127^\circ\text{YX-LiNbO}_3$ structure was developed successfully via resonator design and evolutionary algorithm optimization. The experimental results indicate that the center frequency of the filter, relative bandwidth, and passband insertion loss are 1 514 MHz, 0.46%, and only 1.45 dB, respectively. Further, the attenuation at the frequency 20 MHz outside the passband decreases to 24 dB, remote out-of-band attenuation is greater than 30 dB, attenuation at the WiFi band is up to 48 dB, TCF is $-20 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$, and the size of the device is $1.1 \text{ mm} \times 0.9 \text{ mm}$.

Key words: TCSAW filter; ladder-type topology; shunt capacitance; narrow-band; low insertion loss

0 引言

窄带声表面波滤波器在通信系统中应用较广,其相对带宽一般在 0.2%~1%,小于常规声表面波滤波器 2%~4.5%的相对带宽。为了获得窄带特性,文献报道的方法主要分为两类:一类是降低机电耦合系数,如选择石英^[1]、四硼酸锂(LiB_4O_7)^[2]或 $\text{SiO}_2/\text{Cu}/36^\circ \sim 48^\circ\text{YX-LiTaO}_3$ ^[3-4]等材料做基底;另一类是优化拓扑结构,如采用相位反转双模结构(DMS)^[4]、M 推演梯形结构^[5-6]等。然而大部分窄带滤波器的插入损耗偏大,其中较小的是村田

公司基于 $\text{SiO}_2/\text{Cu}/36^\circ \sim 48^\circ\text{YX-LiTaO}_3$ 与相位反转 DMS 结构设计的窄带滤波器,带内插入损耗约为 2 dB^[4]。为了减小窄带滤波器的插入损耗,本文采用 $\text{SiO}_2/\text{Cu}/127^\circ\text{YX-LiNbO}_3$ 结构,在梯形拓扑的基础上,通过引入并联电容大幅改变反谐振点频率,以牺牲较小插入损耗的代价来缩小带宽。

1 滤波器设计

1.1 梯形拓扑的改进

常规梯形拓扑由串联谐振器(Z_s)与并联谐振器(Z_p)构成,如图 1(a)所示。当串联谐振器的谐振

收稿日期:2024-01-23

作者简介:黄亮(1988-),男,陕西省安康市人,工程师,硕士。

频率 f_r^s 与并联谐振器的反谐振频率 f_a^p 相等时,该结构形成以 f_r^s 或 f_a^p 为中心频率的带通滤波器,其带宽由谐振器的谐振频率与反谐振频率间的频率差 Δf (或机电耦合系数 K^2)和串并联谐振器静态电容比 C_o^p/C_o^s 综合决定。选择机电耦合系数较小的材料作为基片是实现窄带滤波器的惯用方法,但机电耦合系数过度减小会导致基片的机电转换效率大幅降低,进而使滤波器插入损耗急剧恶化^[5]。其次,增加串并联谐振器静态电容比 C_o^p/C_o^s ,滤波器的带宽收窄,但过渡带宽也同时增加,导致滤波器过渡带抑制变差。此外,若 C_o^p/C_o^s 过大,则整个滤波器的体积也随之增大。综上所述,在采用常规梯形拓扑的情况下,仅通过减小基片的机电耦合系数或调整静态电容比的方法无法满足高性能窄带滤波器的研制需求,亟需对拓扑结构进行改进。

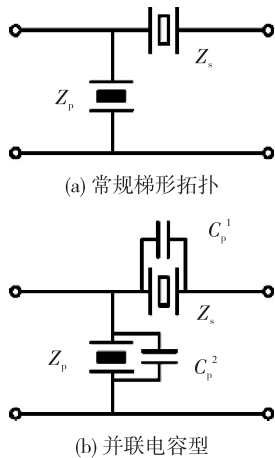
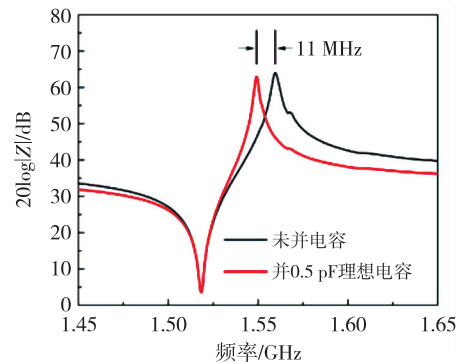
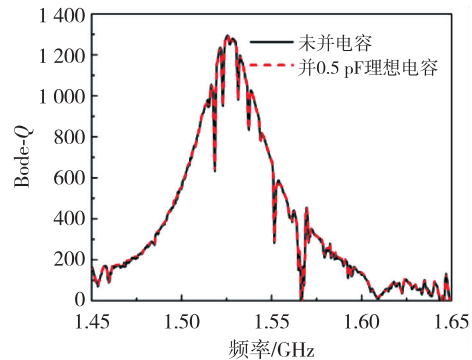


图 1 两种梯形拓扑结构

本文在梯形拓扑的基础上引入并联电容 C_p ,并提出并联电容型梯形拓扑,其拓扑结构见图 1(b)。采用实验的方法制作了基于 $\text{SiO}_2/\text{Cu}/127^\circ\text{YX-LiNbO}_3$ 基片的谐振器,其阻抗曲线如图 2(a)中的黑线所示。当谐振器并联 0.5 pF 理想电容后,曲线的谐振频率点无变化,但是反谐振频率点向低频方向发生了较大幅度的移动(11 MHz),如图 2(a)中红线所示。通过对谐振器施加并联电容的方式,大幅缩小了阻抗曲线谐振点与反谐振点之间的频率差,进而有效地减小了滤波器带宽。同时计算了并联 0.5 pF 理想电容前后整体的 Bode-Q 值,见图 2(b)。由图 2(b)可知,并联 0.5 pF 理想电容前后整体的 Bode-Q 值基本保持不变,即并联理想电容后的梯形拓扑可以在不牺牲插入损耗的前提下缩小带宽。



(a) 阻抗曲线



(b) Bode-Q

图 2 谐振器并联 0.5 pF 理想电容前后电性能对比

在实际情况下,理想电容需用叉指电容替代,叉指电容的损耗必然会被计入滤波器的整体损耗中。根据等效电路理论,叉指电容可以等效为理想电容串联一个电阻,电阻值通过取低频段阻抗曲线的实部获得。据估算, 0.5 pF 叉指电容的电阻值约为 $1\ \Omega$ 。将电阻代入电路,计算了不同电阻值对整体 Bode-Q 值的影响,如图 3 所示。

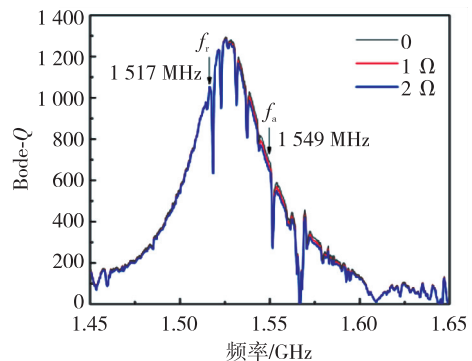


图 3 不同电阻值对整体 Bode-Q 值的影响

由图 3 可知,电阻分别为 $0\ \Omega$ 、 $1\ \Omega$ 、 $2\ \Omega$ 时,谐振频率点 f_r 处的 Bode-Q 值始终保持不变,反谐振频率点 f_a 处的 Bode-Q 值分别为 707.9 、 684.7 与 663 。随着电阻的增大,仅反谐振点附近的 Bode-Q 值有所恶化,但整体恶化的幅度不大。因此,若将理想

电容替换为叉指电容,并联电容型梯形窄带滤波器的插入损耗会有所恶化,但恶化幅度较小。

1.2 谐振器设计

1.2.1 基片的选择

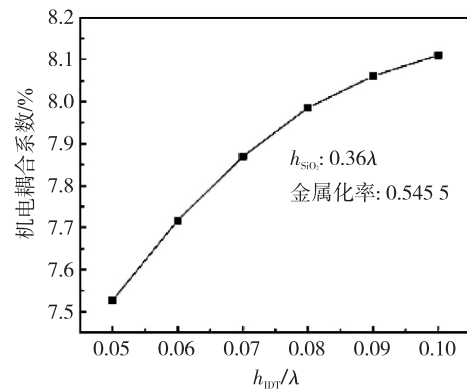
并联电容型梯形窄带滤波器,其谐振器的设计关键在于选择具有合适机电耦合系数与较低频率温度系数的基片。具有较好温度稳定性的基片包括石英、四硼酸锂、 $\text{SiO}_2/\text{Cu}/36^\circ\sim 48^\circ\text{YX-LiTaO}_3$ 与 $\text{SiO}_2/\text{Cu}/127^\circ\text{YX-LiNbO}_3$ 等,其机电耦合系数分别约为 0.14%、1%、3.5% 与 8%^[2-3]。

本文设计的窄带滤波器相对带宽为 0.46%。上述基片中石英的机电耦合系数太小,不满足目标带宽的设计需求;四硼酸锂是强碱弱酸盐,水和酸性溶液均对基片有一定的侵蚀作用,可靠性风险较高,故不采用; $\text{SiO}_2/\text{Cu}/36^\circ\sim 48^\circ\text{YX-LiTaO}_3$ 是一种用于窄带滤波器的较优基片,村田公司也有相关研究报道,但是其滤波器的插入损耗仅约 2 dB^[4],其原因是机电耦合系数较小,且机电转换效率较低; $\text{SiO}_2/\text{Cu}/127^\circ\text{YX-LiNbO}_3$ 的机电耦合系数虽然偏高,但是结合谐振器并联电容的方式,谐振器谐振点与反谐振点之间的频率差明显缩小,整体等效机电耦合系数与 $\text{SiO}_2/\text{Cu}/36^\circ\sim 48^\circ\text{YX-LiTaO}_3$ 相当,适用于目标窄带滤波器。由于叉指电容的加入几乎不降低整体的 Bode-Q 值,且 $\text{SiO}_2/\text{Cu}/127^\circ\text{YX-LiNbO}_3$ 的机电转换效率也相对更高,相比 $\text{SiO}_2/\text{Cu}/36^\circ\sim 48^\circ\text{YX-LiTaO}_3$ 基片,采用 $\text{SiO}_2/\text{Cu}/127^\circ\text{YX-LiNbO}_3$ 基片设计的滤波器的插入损耗将有望更低。此外, $\text{SiO}_2/\text{Cu}/127^\circ\text{YX-LiNbO}_3$ 基片的声表面波波速小于 $\text{SiO}_2/\text{Cu}/36^\circ\sim 48^\circ\text{YX-LiTaO}_3$ 基片的波速, $\text{SiO}_2/\text{Cu}/127^\circ\text{YX-LiNbO}_3$ 的芯片面积更小,有利于器件的小型化。综上,本文选择 $\text{SiO}_2/\text{Cu}/127^\circ\text{YX-LiNbO}_3$ 作为谐振器的基片。

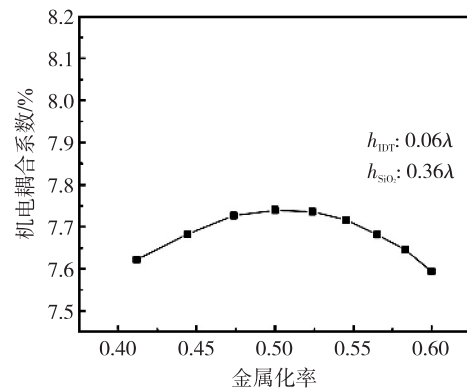
1.2.2 几何参数的优化

采用谐振器并联电容的方式虽然可以缩小阻抗曲线谐振点与反谐振点之间的频率差,但是适当减小基片本身的机电耦合系数 K^2 有助于提升滤波器的矩形系数。本文采用 2D 有限元模型计算了 $\text{SiO}_2/\text{Cu}/127^\circ\text{YX-LiNbO}_3$ 结构中各参数对谐振器机电耦合系数的影响。图 4 为 K^2 随着叉指换能器相对膜厚、叉指金属化率与 SiO_2 相对厚度的变化曲线。仿真所用材料参数来源于文献[7-9]。由图可知,随着叉指换能器相对膜厚的增加, K^2 逐渐增

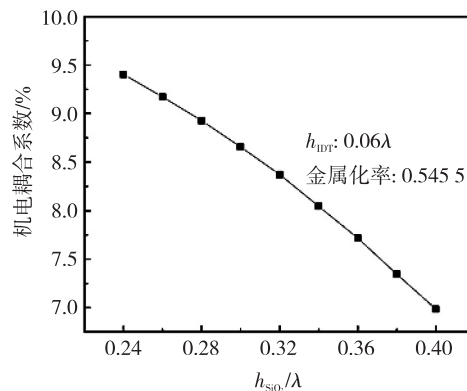
大;随着金属化率的增加, K^2 先增大后减小,但整体变化幅度不大,在金属化率为 0.5 时达到峰值;随着 SiO_2 相对厚度的增加, K^2 逐渐减小,且变化幅度相对更大。



(a) 叉指换能器相对膜厚



(b) 金属化率



(c) SiO_2 相对厚度

图 4 机电耦合系数随各参数的变化

图 5 为频率温度系数 TCF 与 SiO_2 相对厚度的关系。由图可见,谐振频率与反谐振频率的频率温度系数均随着 SiO_2 相对厚度的增加而减小。当 SiO_2 相对厚度为 0.36 时,谐振频率 TCF 为 $6.429 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$,反谐振频率 TCF 为 $-5.358 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ 。本文选择将谐振器叉指换能器的相对膜厚控制在

0.06 左右,将 SiO₂ 的相对厚度设为 0.36,在降低机电耦合系数的同时兼顾谐振器的 TCF。为了便于加工,设置金属化率为 0.545 5。

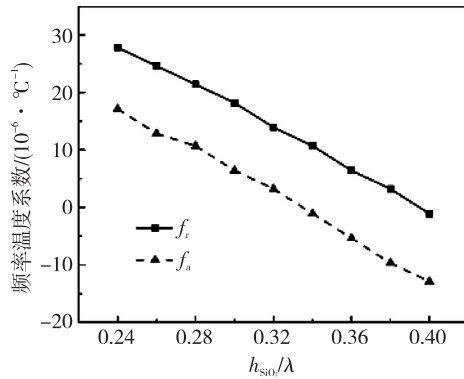


图 5 频率温度系数 TCF 与 SiO₂ 相对厚度的关系

在设计基于 SiO₂/Cu/127°YX-LiNbO₃ 结构的 TCSAW 滤波器之前,还必须解决谐振器的横波抑制问题。本文采用活塞模式原理抑制横波,结合 3D 有限元仿真与实验,探索出较优的活塞设计方案。

1.3 滤波器寻优

借助进化算法进行滤波器寻优,寻优的过程如图 6 所示。

- 1) 给定叉指换能器绝对膜厚、叉指金属化率与 SiO₂ 绝对厚度。
- 2) 给定待优化拓扑结构,并根据该拓扑结构建立电磁仿真模型,输出考虑封装电磁效应的 S 参数。
- 3) 参考 COM 模型计算的单个谐振器的导纳,寻找目标谐振点与反谐振点对应的周期,并给出周期、根数、孔径、电容等待优化变量的上下限。
- 4) 采用 COM 模型加载电磁效应 S 参数的办法仿真滤波器的完整性能,设定待优化目标。根据待优化变量与目标数量的规模,选择合适的进化算法进行迭代优化。
- 5) 迭代完毕后,若得到符合目标要求的结果,则跳入下一步,反之更换拓扑结构重新进行步骤 2)-4)。
- 6) 根据优化得出滤波器参数并绘制版图,重新建立电磁仿真模型,输出新的电磁效应 S 参数,再带入 COM 模型确认性能是否满足。若是,则绘制掩模版流片;若否,则重新进行步骤 2)-6)。

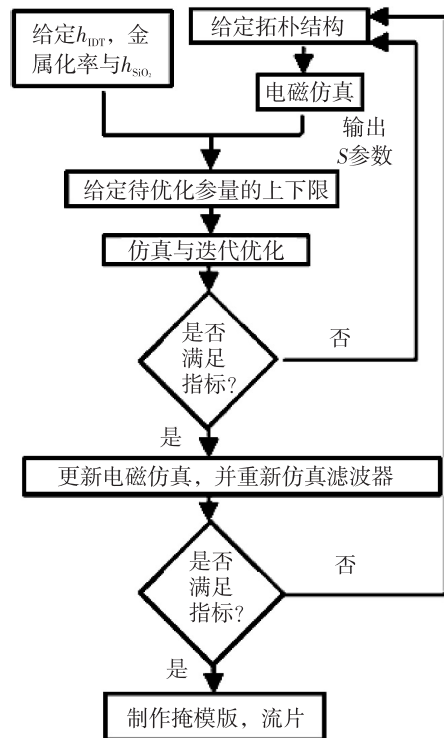


图 6 滤波器寻优流程图

本文尝试了多种拓扑结构,包括四串四并、三串四并、三串三并与二串三并等,最终根据二串三并的拓扑得到满足目标要求的结果,其拓扑结构如图 7 所示。

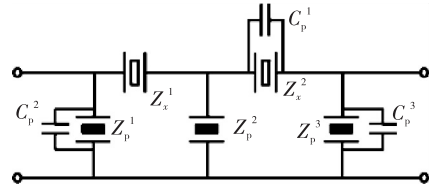


图 7 低插损窄带 TCSAW 滤波器的拓扑结构

2 制备与测试结果

根据滤波器的寻优结果绘制版图,理想电容 C_p¹、C_p² 与 C_p³ 值分别为 0.48 pF、0.93 pF 与 0.77 pF,均用 70~80 根叉指换能器等效替代。为了提升功率容量,串联谐振器每级均等效分裂成 3 个相等且孔径增大 3 倍的谐振器,如图 8(a)所示。采用剥离工艺在 127°YX-LiNbO₃ 基片上制备厚 140 nm 的 Cu 金属叉指换能器,条宽比为 1.2 : 1。加镀一层 Cu 金属点阵,再覆盖 850 nm 的温度补偿层 SiO₂,最后用 Si_xN_y 对芯片进行钝化处理。采用塑封形式封装芯片,器件尺寸为 1.1 mm×0.9 mm,其器件外观如图 8(b)所示。

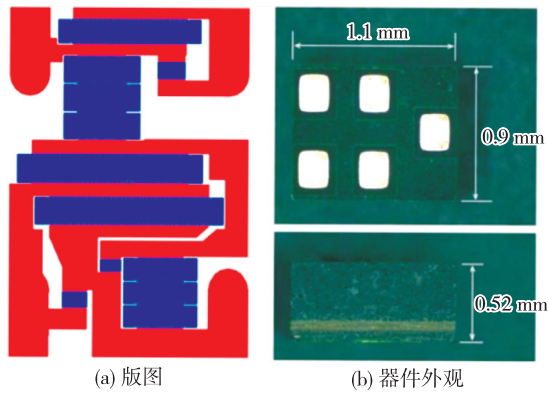


图8 滤波器实物图

采用是德科技的网络分析仪测试了该滤波器,测试结果如图9所示。滤波器的中心频率为1 514 MHz,带宽为7 MHz,相对带宽为0.46%,带内插入损耗最小为1.26 dB,最大为1.45 dB,过渡带20 MHz带外抑制滚降到24 dB,远带带外抑制大于30 dB。由图可见,带内吻合较好,过渡带稍有偏差,远带抑制3~6 GHz测试曲线略有抬起,但测试曲线整体趋势与仿真曲线大体一致。

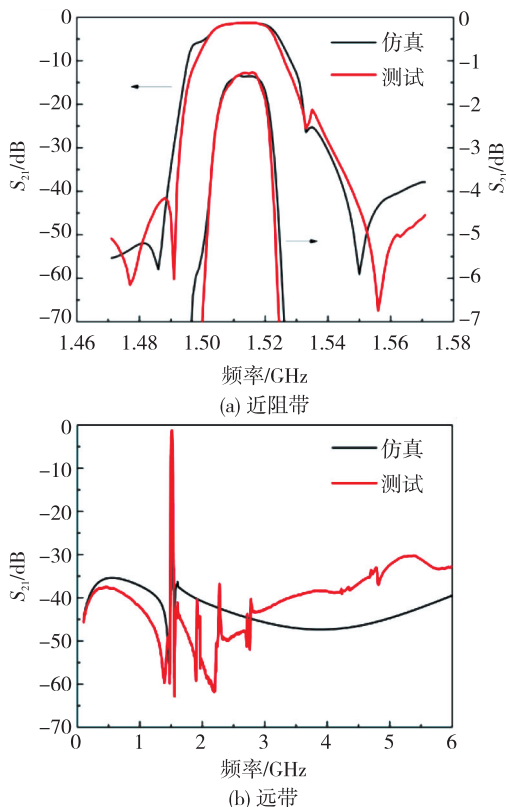


图9 窄带滤波器仿真与测试曲线对比

测试了滤波器在不同温度环境下的性能,如图10所示。当温度升高到85℃时,滤波器频率下移1.8 MHz,插入损耗增大到1.7 dB;当温度降低到

-20℃时,滤波器频率上移1.3 MHz,插入损耗1.44 dB。滤波器的频率温度系数TCF约为 $-20 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$,略大于仿真数据。其原因可能与材料温度系数的准确度有关。

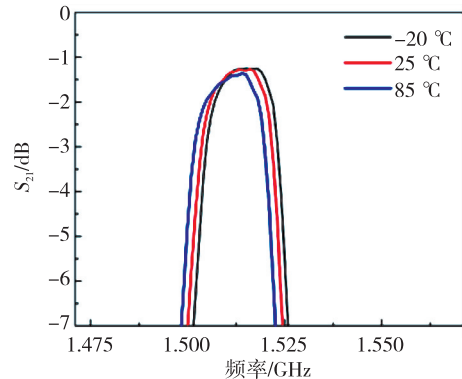


图10 窄带滤波器的高低温测试曲线

3 结束语

本文在梯形拓扑的基础上引入并联电容,提出了一种并联电容型梯形拓扑。利用并联电容大幅改变反谐振点频率的特点,研制出一款基于 $\text{SiO}_2/\text{Cu}/127^{\circ}\text{YX-LiNbO}_3$ 结构的低插损窄带TCSAW滤波器。滤波器的相对带宽为0.46%,带内插入损耗仅1.45 dB,过渡带20 MHz带外抑制滚降到24 dB,远带带外抑制大于30 dB,器件尺寸 $1.1 \text{ mm} \times 0.9 \text{ mm}$ 。虽然 $-20 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 的TCF偏大,但也能保证20 MHz过渡带在全温环境下20 dB以下的抑制能力。此外,如果不考虑成本,将该拓扑应用于基于POI复合材料的薄膜型FSAW中,滤波器的TCF将有较大改善,插入损耗也会进一步降低^[10-11]。

参考文献:

- [1] 周卫,刘善群,陈峻,等. 2.4 GHz石英窄带低损耗声表面波横波谐振滤波器[J]. 压电与声光, 2015, 37(3): 405-407.
ZHOU W, LIU S Q, CHEN J, et al. 2.4 GHz surface transverse wave resonator filter with low loss and narrowband on quartz[J]. Piezoelectrics & Acousto-optics, 2015, 37(3): 405-407.
- [2] 杨丽萍,万飞,杨思川,等. 四硼酸锂在高频窄带滤波器上的应用探讨[J]. 压电与声光, 2014, 36(1): 27-31.
YANG L P, WANG F, YANG S C, et al. Discussion on application of LBO for high-frequency and narrowband filters[J]. Piezoelectrics & Acousto-optics, 2014, 36(1): 27-31.

- [3] MURATA T, KADOTA M, NAKAO T, et al. Radio frequency surface acoustic wave filter having narrow bandwidth and excellent temperature characteristic [J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2008, 47(5):4101-4103.
- [4] MURATA T, KADOTA M, NAKAO T, et al. Improvement of shape factor and loss of surface acoustic wave resonator filter composed of SiO_2 /high-density-electrode/ LiTaO_3 [J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2009, 48:1-4.
- [5] KOMATSU T, TANAKA Y, HASHIMOTO K, et al. Design of narrow bandwidth ladder-type filters with sharp transition bands using mutually connected resonator elements[C]//[S. 1.]: IEEE Ultrason Symp Proc, 2008:1576-1579.
- [6] 陈晓阳, 苏博, 叶志, 等. TC-SAW 滤波器仿真与设计技术[J]. 压电与声光, 2023, 45(4):560-565.
CHEN X Y, SU B, YE Z, et al. Simulation and design technology of TC-SAW filter[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2023, 45(4):560-565.
- [7] KOVACS G, ANHORN M, ENGAN H E, et al. Improved material constants for LiNbO_3 and LiTaO_3 [C]//[S. 1.]: IEEE Ultrason Symp Proc, 1990:435-438.
- [8] SMITH R T, WELSH F S. Temperature dependence of the elastic, piezoelectric, and dielectric constants of Lithium Tantalate and Lithium Niobate[J]. Journal of Applied Physics, 1971, 42(6):2219-2230.
- [9] WU P, EMANETOGLU N W, TONG X, et al. Temperature compensation of SAW in $\text{ZnO}/\text{SiO}_2/\text{Si}$ structure[C]//[S. 1.]: IEEE Ultrason Symp Proc, 2001:211-214.
- [10] BUTAUD E, TAVEL B, BALLANDRAS S, et al. Smart cutTM piezo on insulator (POI) substrates for high performances SAW components [C]//[S. 1.]: IEEE Ultrason Symp Proc, 2020:1-4.
- [11] TAKAI T, IWAMOTO H, TAKAMINE Y, et al. High performance SAW resonator with simplified $\text{LiTaO}_3/\text{SiO}_2$ double layer structure on Si substrate [C]//[S. 1.]: IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2019:1006-1013.