

具有片上电感的改进型梯形声表面波滤波器

杨茂坤^{1,2}, 帅 垚^{2,3}, 魏子杰^{2,3}, 吴传贵^{2,3}, 罗文博^{2,3}, 张万里^{2,3}

(1. 重庆邮电大学 光电工程学院, 重庆 400065; 2. 电子科技大学 重庆微电子产业技术研究院, 重庆 401332;

3. 电子科技大学 电子科学与工程学院, 四川 成都 611731)

摘要:针对小体积声表面波(SAW)滤波器性能受封装影响较大的问题,提出了一种新型 SAW 梯形滤波器电路拓扑结构。通过分析滤波器高频受封装影响造成的远端抑制上翘的现象,从电路结构出发,改变版图设计,实现了片上电感。采用传统梯形滤波器结构和利用纵向耦合双模谐振器型滤波器(DMS)特殊接地结构相结合的电路拓扑结构,有助于提高带外抑制和设计灵活性。在标准的 42°Y-X 钽酸锂(LiTaO₃)基板上制作滤波器,通过仿真分析得到中心频率 2 580 MHz、带宽 50 MHz、插入损耗小于 2.5 dB 的高阶梯形射频 SAW 滤波器的最优拓扑结构。测试结果表明,通过改变电路拓扑结构关键参数和引入新的传输零点,可改善在高频段内的带外抑制特性。

关键词:封装;声表面波(SAW)滤波器;片上电感;DMS 结构;传输零点;带外抑制

中图分类号:TN384;TN309.54 **文献标识码:**A

Improved Trapezoidal SAW Filter with On-Chip Inductance

YANG Maokun^{1,2}, SHUAI Yao^{2,3}, WEI Zijie^{2,3}, WU Chuangui^{2,3},

LUO Wenbo^{2,3}, ZHANG Wanli^{2,3}

(1. College of Optoelectronic Engineering, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China;

2. Chongqing Institute of Microelectronics Industry Technology, University of Electronic Science and Technology of China,

Chongqing 401332, China; 3. School of Electronic Science and Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China)

Abstract: The performance of small-volume surface acoustic wave (SAW) filters is significantly affected by packaging. To solve this problem, a new SAW trapezoidal filter circuit topology is proposed. By analyzing the phenomenon of the upturn of the remote rejection caused by the packaging of the filter at high frequency, the layout design is changed from the circuit structure to realize the on-chip inductance. The circuit topology that combines the conventional trapezoidal filter structure with the special grounding structure of the longitudinally coupled dual-mode resonator type filter (DMS) contributes to out-of-band rejection and design flexibility. The optimal topology of the high-order RF SAW filter with a center frequency of 2 580 MHz, bandwidth of 50 MHz, and an insertion loss of less than 2.5 dB is obtained via simulation analysis on a standard 42°Y-X lithium tantalate (LiTaO₃) substrate.

Key words: package; surface acoustic wave (SAW) filter; on-chip inductance; dual-mode resonator type filter (DMS) structure; transmission zero; out-of-band inhibition

0 引言

声表面波(SAW)滤波器具有成本低,体积小,设计灵活性大及可靠性高等优点,广泛应用于无线通信、雷达、电视及音频等领域,现已成为射频前端应用的主流滤波器之一。常见的 SAW 滤波器主要是椭圆型滤波器、恒定时延滤波器、纵向耦合双模谐振器型滤波器(DMS)和梯形滤波器^[1]。梯形滤波器由通

过构建单端口梯形 SAW 谐振器组成,通常用于一个非平衡的输入和输出。通过使用多个串、并联的单端口 SAW 谐振器级联构成基本的电路拓扑结构,串、并联的单端口谐振器具有不同的谐振频率,最后由电耦合实现滤波器的基本功能。

SAW 滤波器较敏感,受污染后严重影响器件的性能。因此,在实际使用过程中常需采用特殊方

收稿日期:2024-01-26

基金项目:四川省科技计划基金资助项目(2020YFJ0002)

作者简介:杨茂坤(1997-),男,重庆市垫江县人,硕士生。

式保护 SAW 滤波器芯片。但封装外壳、键合线、汇流条等因素造成的电磁寄生参数会对滤波器性能产生严重影响,且随着封装尺寸的小型化,焊盘间距越来越小,滤波器输入/输出端的直通效应逐渐增加,导致滤波器的隔离度和带外抑制恶化^[2]。

本文主要研究电路拓扑结构对 SAW 滤波器性能的影响,首先设计一种特殊的梯形电路拓扑结构实现滤波器远端带外抑制上翘的现象,然后利用电路仿真软件和电磁仿真软件进行声-电磁联合仿真,通过优化电路结构和版图设计,从版图结构上实现片上电感来改善滤波器带外抑制。

1 具有传输零点的 SAW 滤波器设计原理及结构

传统的基本 SAW 谐振器由中间的一个叉指换能器(IDT)及两侧的反射栅组成^[3],如图 1(a)所示。IDT 是一对金属指状物的交错梳,它可激发衬底中的声表面波,两个反射器反射声表面波,并在他们之间形成一定频率的驻波,其等效 MBVD 电路模型如图 1(b)所示。图中, C_m 为动态电容, L_m 为动态电感, R_m 为动态电阻, C_0 为静态电容, R_0 为电学部分损耗, R_s 为器件互连通路上的损耗。

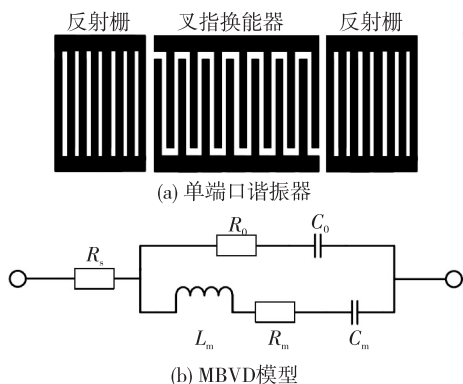


图 1 单端口谐振器及 MBVD 模型

独立谐振器的导纳函数具有对应于并联谐振器的传输零点 f_{sSH} 和对应于串联谐振器的传输极点 f_{pSE} ,这种单个谐振器的串联和并联连接,串联谐振器的谐振频率 f_{sSE} 等于并联谐振器的反谐振频率 f_{pSH} ,形成了梯形滤波器的通带部分,且其本身表示通带下方和上方具有两个有限传输零点的带通滤波器。梯形滤波器的基本电路拓扑结构及其响应如图 2 所示。为了引入新的传输零点以改善远端带外抑制的特性,在并联谐振器上串联了一个接地电感^[4],串联后滤波器的基本电路结构及其响应如图 3 所示。

并联谐振器串联接地电感后,并联谐振器的谐振点随着串联电感值的增大逐渐发生左移,随着传输零点的出现,滤波器的远端抑制性能有所改善。

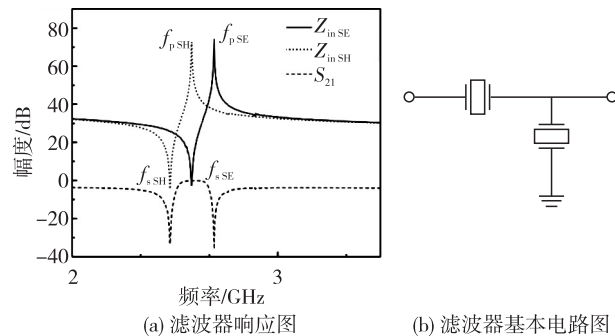


图 2 滤波器基本电路图及其响应

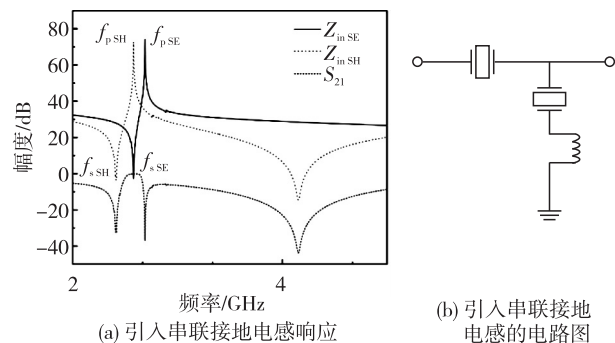


图 3 引入串联接地电感的电路图及其响应

2 版图设计实现片上电感

采用封装形式为 SMD 3030C,封装规格为 $3\text{ mm} \times 3\text{ mm}$ 。SMD 封装是一种陶瓷表面贴装封装形式,由金属封盖、引线、汇流条、电极、陶瓷外壳等组件构成,封装示意图如图 4 所示。

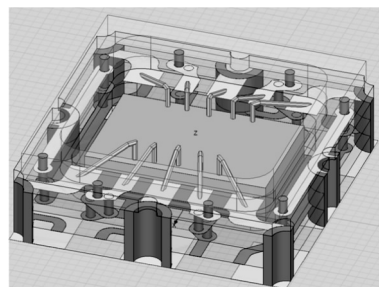
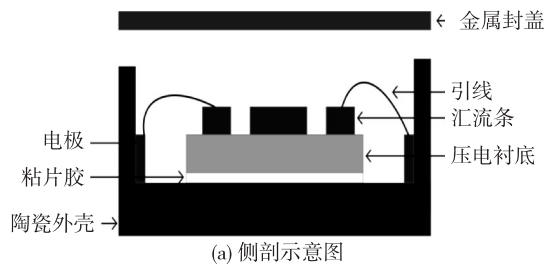


图 4 SMD 3030C 封装

在高频范围内,SAW滤波器封装管壳带来的寄生电感会出现远端抑制上翘情况,可通过改变封装管壳接地键合线的条数、打线长度、键合线尺寸等因素进行改善。从电路拓扑结构出发,通过改变版图汇流条走线的形状实现片上电感用以匹配管壳寄生参数带来的影响。图5为串联不同电感值的滤波器幅-频特性。由图可看出,随着电感值的增大,滤波器的远端出现了一个新的传输零点,且传输零点随着电感值的增大逐渐左移。当电感小于 0.5 nH 时,传输零点出现在大于 6 GHz 处,滤波器的通带随着电感值的增大而变差,此趋势在多阶串并联梯形滤波器电路拓扑结构中变化更明显。

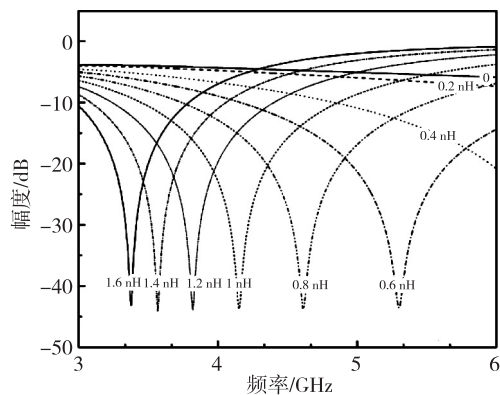
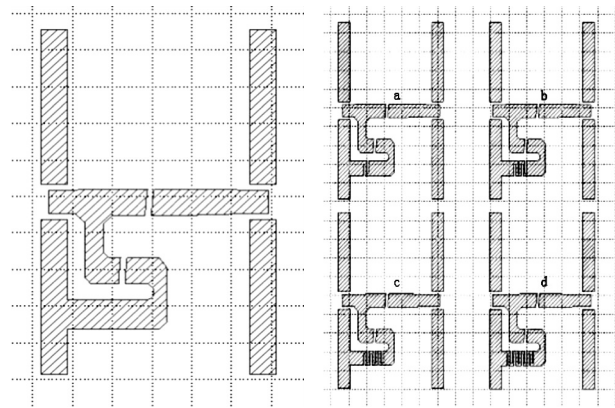


图5 不同电感值下的传输零点随频率变化特性

在电路拓扑结构中,通过修改接地电感值可实现传输零点的移动,但基于SMD封装类型的SAW滤波器受封装尺寸的限制,不能利用外加电感来改变传输零点的位置,故而提出了一种通过改变版图汇流条走线的形状来实现片上电感。图6为改变并联臂上汇流条走线形状实现片上电感的不同阶梯版图,从版图上实现了电路拓扑结构中接地电感的作用。为满足版图设计要求,一般谐振器间的走线越宽越好(大于 $15\text{ }\mu\text{m}$)。本文设计的阶梯型汇流条走线采用的线宽均为 $20\text{ }\mu\text{m}$,如图6(b)所示。图中,a为引入了1对阶梯型,b为引入了2对阶梯型,c为引入了3对阶梯型,d为引入了4对阶梯型的汇流条走线。图7为不同阶梯版图的声-电磁联合仿真结果。由图可看出,随着阶梯对数的增加,传输零点逐渐左移,其在传输零点左侧同样频率下的抑制随之增强,阶梯对数的增加意味着并联谐振器串联电感值增加,这与电路拓扑结构中的仿真结果相符。说明通过改变版图汇流条走线的形状在版图上实现片上电感方案的可行性。



(a) 不加阶梯版图

(b) 加阶梯版图

图6 具有片上电感的不同阶梯版图

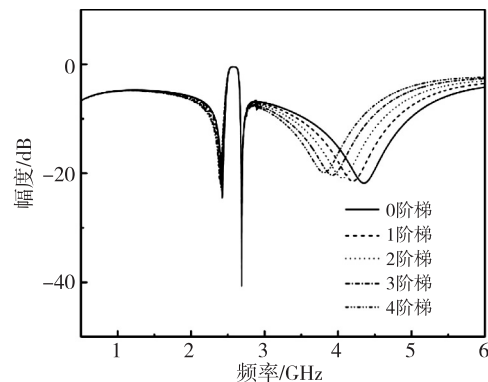


图7 声-电磁联合仿真幅频特性曲线

3 改进型接地方式梯形拓扑电路结构设计

双模DMS结构的特殊接地方式可提高带外抑制^[5]。将DMS的接地和靠近输出的并联谐振器连接,通过键合线连接到PCB,由于引线键合会产生寄生电感,从而影响滤波器性能。这种特殊的接地方式将引入额外的传输零点,通过改变电感可调整传输零点的位置,从而提高带外抑制。图8为DMS结构的建模电路,双端口DMS可用2个串联谐振器和2个并联谐振器连接在一起建模。

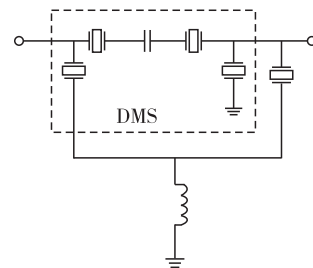


图8 双端口DMS建模

为提高带外抑制,在不改变并联谐振器接地电感值的情况下,在传统梯形滤波器拓扑电路结构中采用DMS结构特殊的接地方式与传统梯形滤波器

结合的方式,即 2 个并联谐振器串联 1 个接地电感,可调整传输零点的位置,达到改善带外抑制的目的。图 9 为采用传统接地方式和 DMS 结构特殊接地方式的幅频特性曲线。在电路拓扑结构中均串联 1 个 0.2 nH 的接地电感。由图可看出,在引入特殊接地方式后,可实现利用小电感值调整传输零点往较小频率范围内的位置移动。

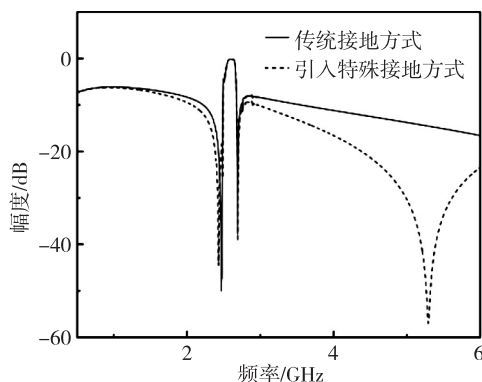


图 9 传统接地方式和引入 DMS 特殊接地方式幅频特性曲线

通过改变版图汇流条的形状实现片上电感,并将这种结构代入中心频率为 $2\,580 \text{ MHz}$ 的 SAW 滤波器设计中。图 10 为引入了 DMS 特殊接地方式和阶梯型汇流条形状的梯形电路拓扑结构设计版图结合 3030C 封装的俯视图。声学响应和引入片上电感前后的声-电磁联合仿真结果对比如图 11 所示,声学响应通带右侧出现 2 个传输零点,是在电路拓扑结构中两条并联臂上各串联了 1 个接地电感,其中引入了 DMS 结构特殊接地方式用以实现小电感在通带远端较低频率的传输零点位置的调整。仿真结果表明,阶梯型汇流条形状的引入,在版图上实现了片上电感,在远端抑制处产生了新的传输零点。传输零点的出现,使 5.4 GHz 附近的带外抑制得到了一定的改善。

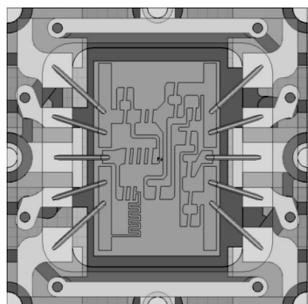


图 10 整体电路设计版图与 3030C 封装俯视图

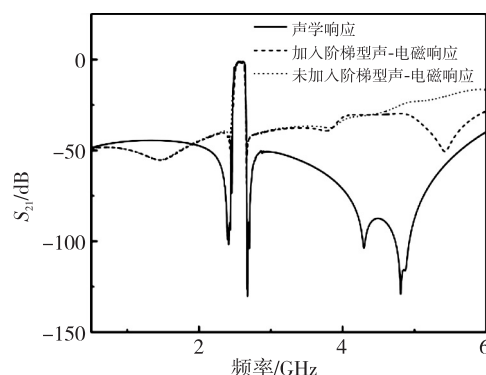


图 11 声学响应和引入片上电感前后声-电磁联合仿真

4 结束语

基于 $42^\circ\text{Y-X LiTaO}_3$ 基板材料,采用 3030C 封装管壳,针对管壳带来的寄生电感对滤波器性能的影响,通过分析不同电路拓扑结构并联臂串联接地电感值的影响,改变版图设计,从版图上实现了片上电感。利用这种结构和特殊的接地方式,研制出一款中心频率为 $2\,580 \text{ MHz}$ 的 SAW 滤波器,插入损耗约为 2 dB ,带内波动小于 1 dB ,左侧带外抑制小于 40 dB ,右侧远端抑制上翘因传输零点的出现而得到相应的改善。

参考文献:

- [1] 李佳励. 高频梯形声表面波带通滤波器的设计[D]. 广州:华南理工大学, 2020.
- [2] 肖立, 杜雪松, 金中, 等. 晶圆级封装对声表滤波器性能的影响[J]. 压电与声光, 2016, 38(4): 628-632.
XIAO Li, DU Xuesong, JIN Zhong, et al. Effect of wafer-level packaging on acoustic meter filter performance[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2016, 38(4): 628-632.
- [3] 王园园. 基于铌酸锂/二氧化硅/硅多层膜结构声表面波滤波器仿真设计[D]. 天津: 天津理工大学, 2022.
- [4] NOVGORODOV V, FREISLEBEN S, HORN-STEINER J, et al. Compact low-loss 2.4 GHz ISM-band SAW bandpass filter on the LTCC substrate[C]// Singapore; 2009 Asia Pacific Microwave Conference, IEEE, 2009: 2072-2075.
- [5] LU Zhou, DONG Yuandan. SAW filter with high out-of-band rejection using improved grounding method [C]// Qingdao, Shandong, China; 2023 IEEE MTT-S International Wireless Symposium(IWS), IEEE, 2023: 1-3.