

面内传播方向对 SAW 滤波器性能的影响研究

朱建宇^{1,2}, 魏子杰^{2,3}, 范维^{2,3}, 李沛然^{2,3}, 钱一聪², 帅垚^{2,3},
吴传贵^{2,3}, 罗文博^{2,3}, 潘忻强^{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: 为了满足窄带声表面波滤波器对品质因数 Q 值和带外抑制日益增长的需求, 提出了一种窄带滤波器设计方法。在基于新型 POI 结构谐振器的基础上, 通过旋转谐振器达到改变波传播角度的目的, 并利用二维全模型得到准确的实验数据, 与原结构谐振器分别代入滤波器设计中进行比较。实验结果表明, 该方法在一定程度上能够有效地增加带外抑制, 对过渡带抑制能力有 2~4 dB 的提升, 且具有设计简便, 占用空间小等优点。

关键词: 声表面波 (SAW); 窄带; 谐振器; 带外抑制; 压电材料

中图分类号: TN384

文献标识码: A

Influence of In-Plane Propagation Direction on the Performance of Surface Acoustic Wave Filters

ZHU Jianyu^{1,2}, WEI Zijie^{2,3}, FAN Wei^{2,3}, LI Peiran^{2,3}, QIAN Yicong², SHUAI Yao^{2,3},
WU Chuangui^{2,3}, LUO Wenbo^{2,3}, PAN Xinqiang^{2,3}, ZHANG Wanli^{2,3}

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

2. Chongqing Microelectronics Industry Technology Research Institute, 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: To meet the increasing demand for Q -value and out-of-band suppression in narrowband surface acoustic wave filters, this paper proposes a design method based on a new type of piezo on insulator (POI) structure resonator. The purpose of changing the wave propagation angle is achieved by rotating the resonator, and accurate experimental data are obtained using a two-dimensional full model, which is compared with the original structure resonator in the filter design. The experimental results show that this method can effectively increase out-of-band suppression, with a 2-4 dB improvement in transition band suppression ability. Additionally, the design is simple and requires little space.

Key words: surface acoustic wave; narrowband; resonator; out-of-band rejection; piezoelectric materials

0 引言

随着 5G 时代的高速发展, 对滤波器的性能要求越来越高。现代无线通信系统具有尺寸紧凑的特点, 因此需要紧凑的滤波器。一般情况下, 每个频段都需要不同的射频 (RF) 滤波器, 以尽量减少串扰, 减轻非线性, 因此常使用声波滤波器 (AW 滤波器)。声波滤波器分为体声波 (BAW) 滤波器和声表面波 (SAW) 滤

波器两种。其中 BAW 滤波器引导信号能量通过基板的主体, 而 SAW 滤波器引导信号能量沿基板表面传递。由于声学传递的物理特性, 近年来村田公司推出了一种高性能 SAW 滤波器结构 (I. H. P. SAW), 很好地限制了表面能量效应, 在拥有高品质因数 (Q) 值的同时, 也有优异的频率稳定性和良好的散热性能, 谐振频率比传统 SAW 谐振器适用范围广。

收稿日期: 2023-12-26

基金项目: 四川省科技计划基金资助项目 (2020YFJ002)

作者简介: 朱建宇 (1998-), 男, 江西省新余市人, 硕士生。帅垚 (1983-), 男, 副教授, 博士

1 实验

1.1 COMSOL 仿真设计

新型结构 SAW 谐振器的基本结构如图 1 所示。以 $42^\circ\text{Y-X-LiTaO}_3$ 、 SiO_2 、Poly-Si、Si 为衬底, Al 为叉指电极材料, 分别对二维和三维模型进行仿真。

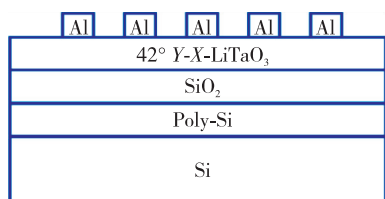


图 1 谐振器基本结构

图 2 为谐振器完整结构, 其由汇流条、反射栅、叉指、假指组成。当在叉指电极上施加交变电压时, 压电材料 ($42^\circ\text{Y-X-LiTaO}_3$) 在逆压电效应的影响下会产生声表面波, 激发的声波传播到反射栅被反射回来, 与原声波叠加形成驻波^[1]。



图 2 电极结构

1.2 COMSOL 仿真模型

在 COMSOL 中分别建立了二维仿真模型和三维仿真模型^[2], 如图 3、4 所示。



图 3 二维 COMSOL 模型

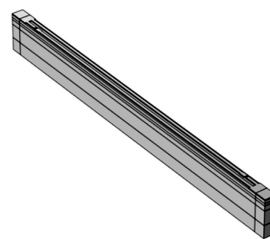


图 4 三维 COMSOL 模型

由图 4 可见, 设置三维旋转坐标系(欧拉角)为 $(0^\circ, 48^\circ, 0^\circ)$, 并设置周期性条件和完美匹配层(PML)。为达成实验目标, 将面内传播角度(γ)设为变量进行参数化扫描, 扫频范围为 $1.0 \sim 1.7 \text{ GHz}$, 步长为 1 MHz 。

二维模型是三维模型的简化, 叉指换能器(IDT)在宽度上无梯度变化, 且一般情况下叉指数目多, 对其进行二维仿真的结果偏差不大。本文通过二维仿真找到相对应的变化关系并分析原因, 再通过三维仿真验证结论的可靠性。

2 实验结果与讨论

2.1 COMSOL 仿真结果

谐振器阻抗为

$$Z = 20 \times \log_{10} |50 \times (1 + S_{11}) / (1 - S_{11})| \quad (1)$$

式中 S_{11} 为谐振器端口 2 匹配时, 端口 1 的电压反射系数。式(1)的计算结果反映了谐振点与反谐振点的频率, 体现了其工作频率和阻抗的变化。

欧拉角(α, β, γ)一定程度上描述了压电材料的切向和波传播方向, 具体角度大小因旋转轴的不同而不同, 其中 α, β 与基片的切割方向相关, γ 反映了波在基片上的传播方向。

图 5 为不同传播角度下的阻抗特性曲线。由图可看出, 随着传播角度增大, 谐振频率与反谐振频率发生变化, 同时反谐振点右侧出现新的谐振峰, 出现位置影响体波波形, 结果如图 6 所示, 其影响随着角度的增大而增大。

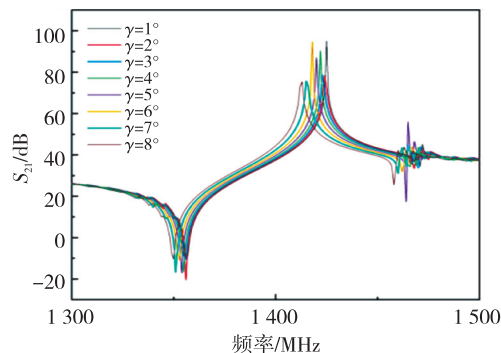


图 5 不同 γ 角度下谐振器仿真结果

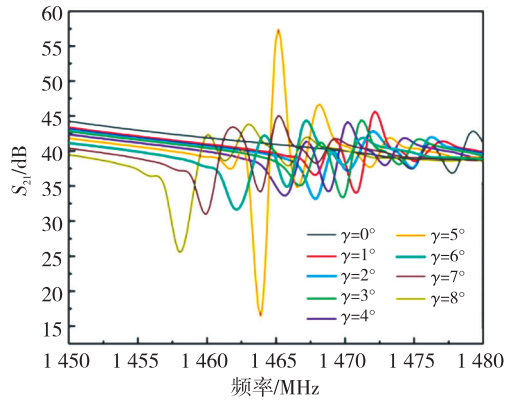
图6 不同 γ 角度下体波仿真结果

表1为不同 γ 角度仿真结果。由表可看出,随着传播角度 γ 的改变,反谐振点的变化速率大于谐振点,说明其机电耦合系数变小^[3],从而影响了过渡带的陡降程度和插入损耗。

表1 不同 γ 角度谐振频率变化情况

$\gamma/(^\circ)$	谐振点频率/MHz	反谐振点频率/MHz
0	1 356.6	1 426.1
1	1 356.5	1 425.6
2	1 356.2	1 424.8
3	1 355.8	1 423.9
4	1 355.4	1 422.9
5	1 354.5	1 420.9
6	1 353.5	1 418.7
7	1 351.9	1 415.7
8	1 350.7	1 413.0

设左侧谐振点为 f_s ,右侧反谐振点为 f_p ,得到有效机电耦合系数 k_{eff}^2 为

$$k_{\text{eff}}^2 = \frac{\Pi^2}{4} \left(\frac{f_p - f_s}{f_p} \right) \quad (2)$$

由式(2)计算可得,随着角度的增加,机电耦合系数从0.119 5减少到0.108 8,且变化率逐渐增大,如表2所示。

表2 机电耦合系数变化结果

$\gamma/(^\circ)$	k_{eff}^2	$\gamma/(^\circ)$	k_{eff}^2
0	0.119 5	5	0.115 3
1	0.119 2	6	0.113 4
2	0.118 8	7	0.111 2
3	0.118 0	8	0.108 8
4	0.117 0		

由表(1)、(2)可见,谐振器的机电耦合系数 k 随传播角度的改变也发生了变化。根据文献[4]的研究,机电耦合系数影响COM模型中 a_n 参数,且直接反映了谐振器带宽的变换:

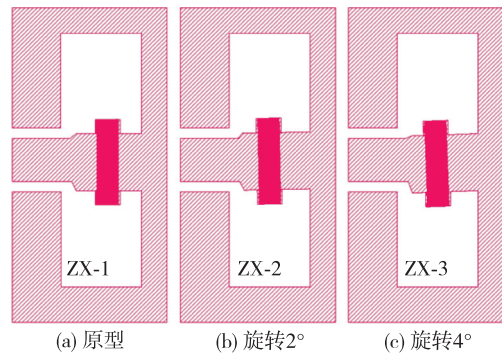
$$a_n = \sqrt{\epsilon_s(\infty) \times \left(\frac{k^2}{2} \right) \times v_R} \quad (3)$$

式中: $\epsilon_s(\infty)$ 为衬底的静态介电常数; v_R 为声速。

设计滤波器时,通过直接修改拟合好的 a_n 数值,间接反映了面传播角度改变后对带外抑制的影响,但不能反映其对体波的影响,需要进一步用谐振器全模型进行仿真,并通过滤波器设计进行验证。

2.2 Klayout 版图设计

谐振器采用GSG单端口结构,反射栅设置为短路结构,上下各15对,通过将谐振器整体旋转以改变传播角度 γ ^[5],具体模型如图7所示。

图7 谐振器整体旋转以改变传播角度 γ 的模型

2.3 ADS 验证

得到COMSOL仿真结果后,为了验证其结果可靠,将COMSOL仿真数据打包成S1P文件,重新进行COM参数拟合,替换设计完成的滤波器拓扑电路中的谐振器。

本文设计了一款中心频率为1 350 MHz、带宽为20 MHz、过渡带宽为20 MHz的滤波器,要求其带外抑制为-40 dB,功率负载为35 dBm。因此,该滤波器对陡降程度要求较高。该滤波器使用七阶“T”型拓扑结构设计,为满足带外抑制和功率要求,适量增加了串联谐振器数量,并通过额外并联电容或谐振器的方式增加陡降^[6],其原始仿真结果如图8所示。

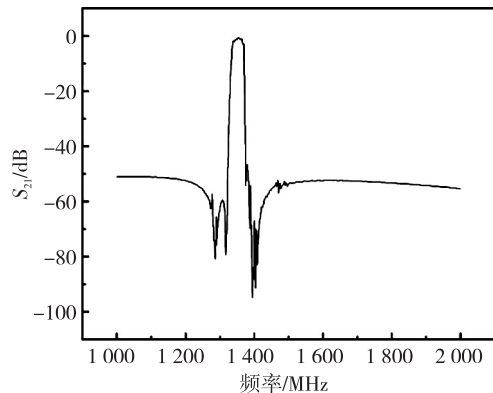


图8 滤波器仿真结果

因传播角度 γ 对谐振器反谐振点影响最大,因此,在电路设计中考虑用不同 γ 角度的谐振器替换串联谐振器,结构示意图如图 9 所示。

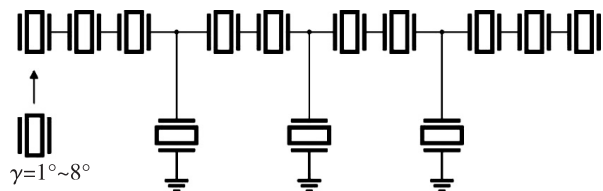


图 9 串联谐振器

研究发现,替换传播角度 $\gamma=1^\circ\sim 8^\circ$ 的串联谐振器(为 1.42 倍半周期)对过渡带的陡降程度影响和对插入损耗的影响随传播角度的增加而增加,符合 COMSOL 对谐振器仿真的结果,体现了增加传播角度以减小机电耦合系数,进而增加过渡带带外抑制能力,实验结果如图 10、11 所示。由图可见,调整传播角度能有效增加过渡带带外抑制。研究发现,随着 γ 的增大,其增加抑制的能力越强,在一定程度上可减少带内波动,为设计窄带滤波器提出了一个新的方法。

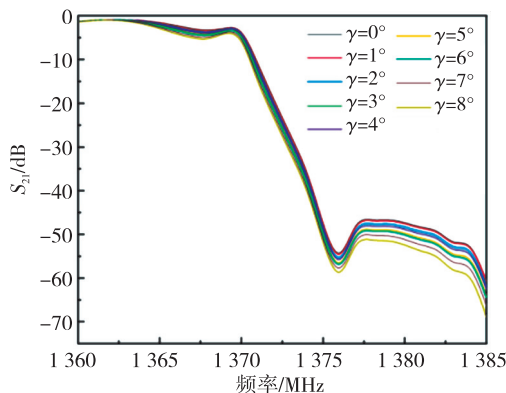


图 10 带外抑制

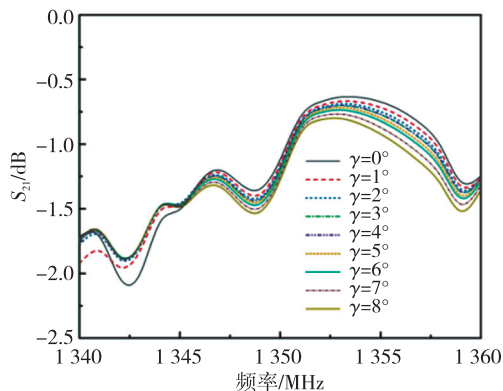


图 11 插入损耗

3 结束语

本文通过对新型 POI 结构 SAW 滤波器进行二维和三维的有限元仿真,得到了传播角度 γ 对谐振器带宽的影响程度。结果表明,通过改变面传播角度 γ 可有效增加过渡带的陡降程度。虽然会导致体波的影响变大,但因其不需要重新设计电路,且无需改变压电材料的特性,使该方法简易有效。通过实验结论得出, $\gamma=3^\circ\sim 4^\circ$ 是最佳角度,该范围下带外抑制能提升 2~4 dB,带内波动由 1.4 dB 降低到 1.1 dB,同时杂波影响最小,有利于后期谐振器数据优化,适用于对过渡带有严格要求的滤波器设计,这为窄带声表面波滤波器的设计提供了参考。

参考文献:

- [1] 钱一聪,帅垚,吴传贵,等. I. H. P. SAW 谐振器孔径对性能的影响[J]. 压电与声光, 2023, 45(3): 350-354.
QIAN Yicong, SHUAI Yao, WU Chuangui, et al. Influence of aperture of I. H. P. SAW resonator on performance[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2023, 45(3): 350-354.
- [2] 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.
- [3] HASHIMOTO K, HASHIMOTO K Y. Surface acoustic wave devices in telecommunications[M]. Berlin: Springer-Verlag, 2000.
- [4] PLESSKY V. Coupling-of-modes analysis of SAW devices[J]. International Journal of High Speed Electronics and Systems, 2000, 10(4): 867-947.
- [5] 何朝峰. 手机用 BAND13(RX)声表面波滤波器的研制[D]. 南京: 东南大学, 2019.
- [6] 黄华, 石玉, 钟慧, 等. 声表面波窄带梯形滤波器的仿真与设计[J]. 压电与声光, 2011, 33(3): 350-352.
HUANG Hua, SHI Yu, ZHONG Hui, et al. Simulation and design of narrow-band SAW ladder-type filter[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2011, 33(3): 350-352.