

电磁寄生参数对 SAW 滤波器性能的影响

魏园林^{1,2}, 帅 垚^{2,3}, 魏子杰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 集成电路科学与工程学院, 四川 成都 611731)

摘要:设计了 B41 频段的声表面波 (SAW) 滤波器, 利用三维电磁场仿真工具 HFSS 建立表面贴装器件 (SMD) 封装和芯片级 (CSP) 封装模型, 对比两种封装的声-电磁联合仿真结果得出, 在滤波器电路拓扑结构中, 当 2 条不同并联支路连接在一起时, 由于 SMD 封装键合引线的电磁寄生参数影响, 滤波器在高频处的带外抑制会出现“上翘”。建立不同键合线数量、直径及长度的 SMD 封装模型, 并仿真计算 S 参数。对比仿真结果可知, 随着键合线直径的增大和长度的减小, 其等效电感逐渐变小, 即键合线的电磁寄生参数逐渐减小, 对 SAW 滤波器性能的影响逐渐减弱, 高频处的带外抑制性能得到优化。结果表明, CSP 封装植球倒扣的电磁寄生参数更小, 声-电磁联合仿真的结果更优, 与实测结果吻合较好。

关键词: SAW 滤波器; 表面贴装器件 (SMD) 封装; 芯片级 (CSP) 封装; 电磁寄生参数; 带外抑制; 键合线

中图分类号: TN384; TN65 **文献标识码:** A

Influence of Electromagnetic Parasitic Parameters on the Performance of SAW Filters

WEI Yuanlin^{1,2}, SHUAI Yao^{2,3}, WEI Zijie³, 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: In this study, a B41 band SAW filter was designed, and SMD and CSP packages were modeled using 3D electromagnetic field simulation software. The acoustic-electromagnetic simulation results of the two packages were compared, leading to the preliminary conclusion that, for the topology of the filter circuit, the out-of-band rejection at high frequencies may increase (warping “upward”) when two different parallel branches are connected. This effect is due to the electromagnetic parasitic parameters of the bonding leads in the SMD package. SMD package models were established and simulated with varying numbers, diameters, and lengths of bonding wires to calculate the S-parameters. The simulation results indicate that as the diameter of the bonding wire increases and the length decreases, its equivalent inductance becomes smaller. Consequently, the electromagnetic parasitic parameters of the bonding wire decrease, reducing their influence on the performance of the SAW filter, and optimizing the out-of-band rejection performance at high frequencies. Additionally, the ball-implanted inverted button of the CSP package exhibits smaller electromagnetic parasitic parameters, resulting in better joint acoustic-electromagnetic simulation outcomes, which align well with the measured results.

Key words: SAW filter; SMD package; CSP package; electromagnetic parasitic parameters; out-of-band rejection; bonding wire

收稿日期: 2024-01-24

基金项目: 四川省科技计划基金资助项目 (2020YFJ0002)

作者简介: 魏园林 (1997-), 男, 四川省巴中市人, 硕士生。帅垚 (1983-), 男, 副教授, 博士。

0 引言

声表面波(SAW)和体声波(BAW)滤波器可实现较高的机电耦合系数(k_t^2)及品质因数(Q)^[1-2],已广泛应用于雷达、卫星通信、航天及手机等射频前端领域。BAW滤波器的工作频率由其顶、底电极和压电层的厚度决定^[3],通过特殊的工艺及结构,其工作频率最高可达6 GHz,具有良好的选择性和高功率处理能力^[4]。但BAW滤波器的工艺复杂,制作成本较高,且受国内目前工艺水平的限制。与之相比,SAW滤波器发展较早,工艺条件更成熟,具有成本低,能实现小型化等优势,在0~3.5 GHz内滤波器应用领域具有重要地位。

在SAW滤波器的设计及验证过程中,除谐振器参数外,封装、键合线及汇流条的电磁寄生参数均会影响SAW滤波器的性能^[5],设计者在仿真阶段若仅考虑声学行为(电路仿真),则后期流片进行封装后,由于电磁寄生参数的影响,其实际测试结果与仿真结果出现较大偏差。因此,在设计阶段需要充分考虑封装壳的电磁寄生参数。在搭建SAW滤波器的电路结构时,若将2条不同的并联支路连接共用地,则可能出现电路仿真结果良好,而声-电磁联合仿真的带外抑制性能在高频处出现“上翘”。因此,本文从SAW滤波器设计出发,利用三维电磁场仿真工具HFSS建立3D封装模型,对比了表面贴装器件(SMD)3030C封装与芯片级(CSP)封装的声-电磁联合仿真结果,并通过调整SMD封装键合线的数量和尺寸,研究了键合线的电磁寄生参数对SAW滤波器带外抑制的影响。

1 实验

1.1 电路结构设计

目前SAW滤波器电路拓扑结构设计主要有T型和 π 型两种,也可采用“T+ π ”相结合的方式。其中T型电路结构是由单端对SAW谐振器连接成梯形而形成的带通滤波器,如图1(a)所示,具有插入损耗低、设计灵活等优点^[6],已成为SAW滤波器设计中的主流选择之一。与 π 型结构滤波器相比,T型结构滤波器带宽较宽,常应用于设计宽带滤波器。本文设计的 π 型电路拓扑结构如图1(b)所示。

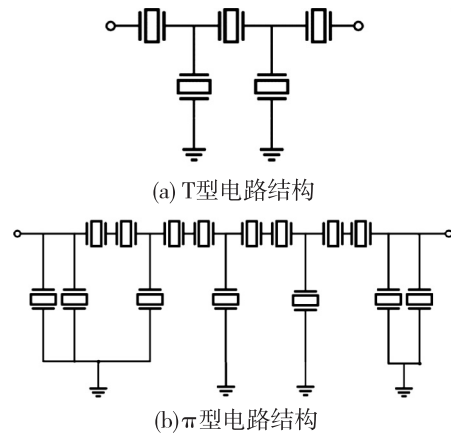


图1 SAW滤波器电路拓扑结构

本文采用耦合模(COM)模型设计通信频段2 595 MHz的SAW滤波器性能如表1所示。首先通过COM模型对实测的SAW谐振器数据进行拟合,得到谐振器的等效参数,再对谐振器进行级联,最后通过调整谐振器的结构参数实现SAW滤波器的性能指标。COM模型能分析SAW谐振器在压电衬底表面的声电效应^[7],是应用于SAW滤波器研究领域的主流模型之一。

表1 B41频段SAW滤波器性能指标

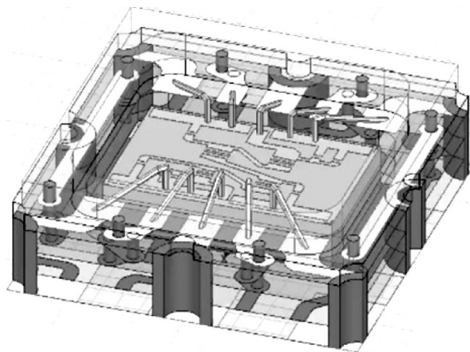
| 参数 | 频率 | 最小值 | 最大值 |
|----------|-------------|-----|-----|
| 通带频率/MHz | 2 515~2 675 | | |
| 插入损耗/dB | | | 3 |
| 驻波比 | | | 2 |
| | 1 000~2 483 | 30 | |
| 带外抑制/dB | 2 715~4 900 | 30 | |
| | 5 025~5 850 | 48 | |

1.2 声-电磁联合仿真封装模型搭建

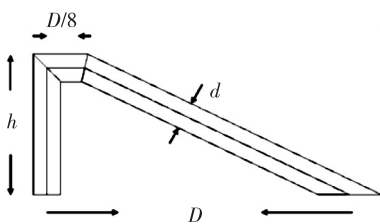
在SAW滤波器的设计和应用中,涉及的封装主要有SMD封装、CSP封装及晶圆级(WLP)封装3种。SMD封装是一种将器件直接粘贴到电路板表面的封装^[8],安装方便,质量轻,但焊接难度高,键合打线的电磁寄生参数较大。CSP封装是一种芯片级封装,尺寸小,集成度高,但成本高,工艺较复杂。WLP封装是一种直接在晶圆上进行封装和测试的封装技术,生产成本低,效率高,但需要高精度的设备和技术。

不同封装形式的特点不同,本文仅讨论SMD封装和CSP封装。

通过调整谐振器参数,使电路仿真达到 B41 频段的设计指标,绘制的 SAW 滤波器版图与 SMD 3030C 封装相结合后的三维模型如图 2(a) 所示。封装的形状、结构及材料均根据封装管壳厂商提供的模型图纸进行 1:1 绘制,与实际大小一致。封装外壳的尺寸为 3 mm×3 mm,采用引线键合的方式连接输入、输出及接地。封装主要由基板、压电衬底及键合线等组成。仿真模型中,将实际截面为圆柱形的键合线简化为六棱柱,标准直径为 $\varnothing 50 \mu\text{m}$,如图 2(b) 所示。图中, h 为键合线垂直高度, d 为键合线直径, D 为键合线水平长度。封装外壳采用 42°Y-X LT/SiO₂/Poly-Si/Si 的多层 POI 衬底结构,绘制的版图共 4 个接地,各有 2 根键合线连接,模型下侧中间和上侧中间的键合线分别连接输入、输出信号,其余键合线接地。



(a) SMD 3030C 封装三维模型



(b) 键合线模型

图 2 SMD 3030C 封装

CSP 封装结构如图 3 所示。封装壳尺寸为 2 mm×1.6 mm,输入、输出及接地采用植球倒扣的方式连接。封装主要由基板、压电衬底及焊球等组成。仿真模型中,将圆形的焊球简化为高度 15 μm 、直径 $\varnothing 126 \mu\text{m}$ 的六棱柱。CSP 封装采用 42°Y-X LT/SiO₂/Poly-Si/Si 多层 POI 衬底结构,标准模型共 4 个接地,模型左、右各 3 颗焊球,左视左侧和右视右侧的焊球分别连接输入、输出信号,其余焊球

接地。

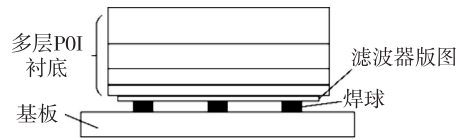


图 3 CSP 封装侧视图

2 实验结果与讨论

2.1 声-电磁联合仿真结果分析

B41 频段 SAW 滤波器的电路仿真与使用标准 SMD 封装和 CSP 封装的声-电磁联合仿真的插入损耗 S_{21} 频响曲线如图 4 所示。由图可看出,电路仿真与 CSP 封装的声-电磁联合仿真结果吻合较好,通带插入损耗和带外抑制等性能良好,但在 SMD 封装的声-电磁联合仿真结果中,SAW 滤波器的高频处带外抑制出现了明显的“上翘”。

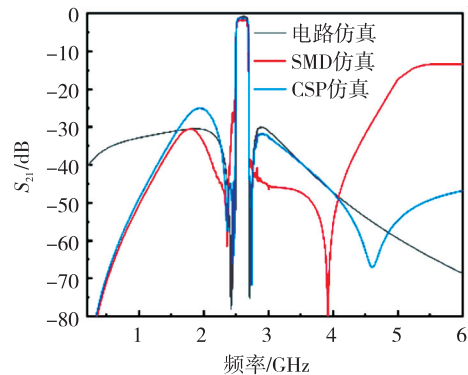


图 4 电路仿真与声-电磁联合仿真结果对比

2 种不同封装的差异主要在于电气连接的方式,SMD 封装采用引线键合,CSP 封装采用植球倒扣,焊球的电磁寄生参数比键合线小。键合线的电磁寄生参数主要是指等效电感,对封装模型中不同键合线尺寸的电感可用集总电感进行表征,即:

$$L = 5l \left[\ln\left(\frac{4l}{d}\right) - \frac{3}{4} \right] \quad (1)$$

式中: L 为键合线等效电感; l 为键合线整体长度。

通过对 SMD 3030C 封装各接地处不同键合线数量和尺寸的调整,进行声-电磁联合仿真后的 S_{21} 频响曲线如图 5 所示。由图可看出,随着各接地处键合线总长的增加和直径的减小,根据式(1)可知,其等效电感不断增大,电磁寄生参数逐渐变大,导致 SAW 滤波器的高频传输零点向低频移动,使得更高频处的带外抑制逐渐变差。

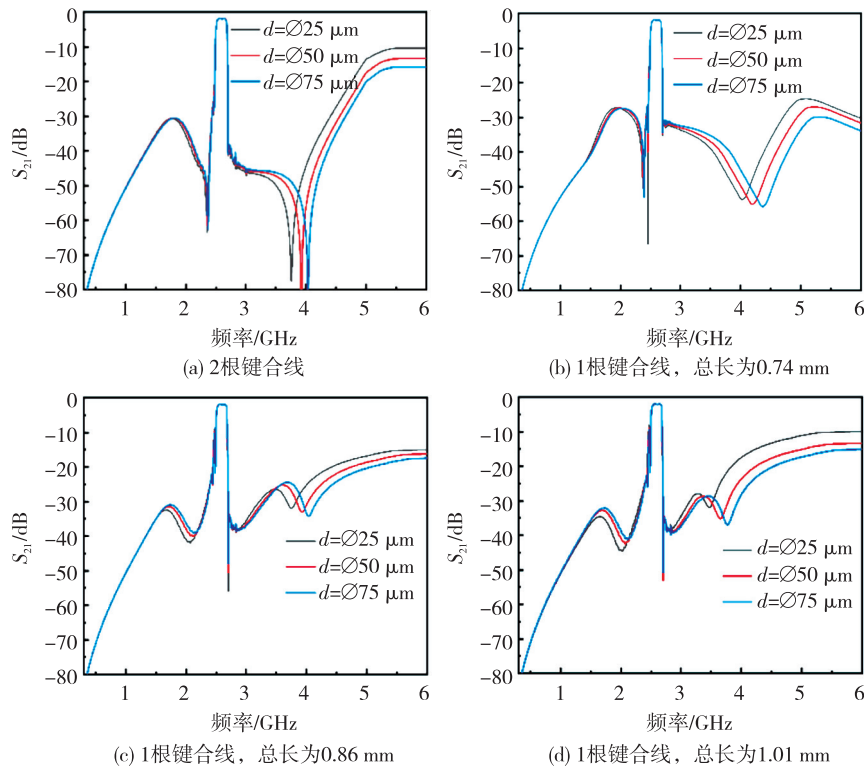


图5 SMD封装不同键合线数量、直径和总长的声-电磁联合仿真结果

对比图5的声-电磁联合仿真结果可知,在图5(b)中键合线总长最短为0.74 mm,直径最大为 $\varnothing 75 \mu\text{m}$ 时,B41频段SAW滤波器的带外抑制性能最好,但仍不满足设计指标。这表明通过减小键合线长度,增大键合线直径,即减小键合线的电磁寄生参数,可优化SAW滤波器带外抑制性能。由于受SMD封装管壳的限制,键合线总长不能无限短,直径不能无限大。因此,选择使用CSP封装进

行流片验证。

2.2 CSP封装声-电磁联合仿真与实测结果对比

CSP封装采用植球倒扣的方式连接输入输出及接地,焊球被简化为高度 $15 \mu\text{m}$ 、直径 $\varnothing 126 \mu\text{m}$ 的六棱柱,焊球的尺寸比键合线直径大,总长小,即SMD封装与焊球的键合线相比,其电磁寄生参数小。使用CSP封装声-电磁联合仿真与流片测试的S参数结果对比如图6所示。

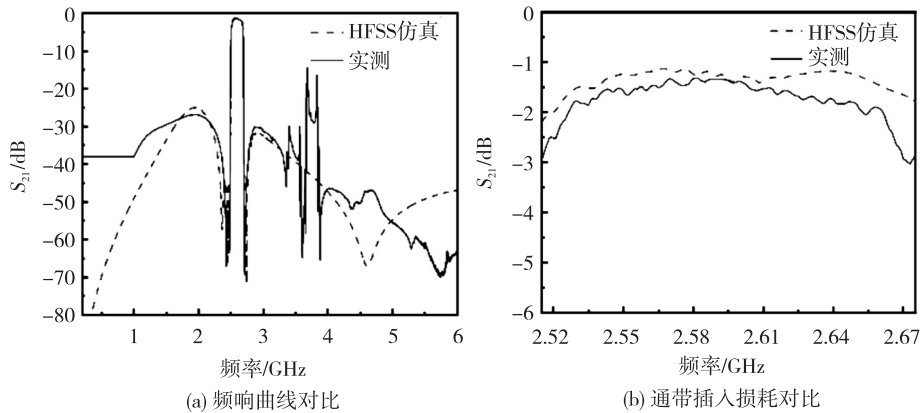


图6 CSP封装电磁联合仿真与实测 S_{21} 频响曲线结果对比

由图6(b)可看出,SAW滤波器通带插入损耗的实测与仿真之间有一定波动,但仍在设计指标内。由图6(a)可知,仿真结果与实测结果吻合较

好。在频率约为3.6 GHz时实测结果波动较大,这是因为B41频段的SAW谐振器在3.6 GHz左右时传播的1个纵波造成的谐振,使SAW滤波器自

然形成一个寄生杂散。

3 结束语

使用三维电磁场仿真工具 HFSS 建立 SMD 3030C 封装和 CSP 封装模型,对设计的 B41 频段 SAW 滤波器进行声-电磁联合仿真,对比计算出的 S 参数,初步验证了当 SAW 滤波器电路拓扑结构中 2 条不同并联支路共用地连接时,SMD 封装键合引线的电磁寄生参数会影响 SAW 滤波器的性能,导致带外抑制在高频处出现“上翘”。调整键合线的数量、长度和直径,对比仿真结果可知,随着键合线直径的增大和总长的减小,键合线的等效电感不断减小,即键合线的电磁寄生参数逐渐变小,对 SAW 滤波器性能的影响逐渐变弱,高频处的带外抑制性能得到优化。同时,对比植球倒扣的 CSP 封装仿真和实测结果可知,与键合线相比,焊球直径较大,长度较小,进行电气连接时其电磁寄生参数较小,SAW 滤波器的性能表现佳,这为搭建 SAW 滤波器电路拓扑结构,实现相应的设计指标及选用相应的封装模型提供了参考。

参考文献:

- [1] RUBY R, GILBERT S, LEE S K, et al. Novel temperature-compensated, silicon SAW design for filter integration[J]. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 2021, 31(6): 674-677.
- [2] XUAN W, GAO F, HE X, et al. Analytical study of the film bulk acoustic resonators based on single crystal LiNbO_3 with different crystal orientations[J]. *Integrated Ferroelectrics*, 2021, 213(1): 182-193.
- [3] LÖBL H P, KLEE M, MILSOMR, et al. Materials for bulk acoustic wave (BAW) resonators and filters [J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2001, 21(15): 2633-2640.
- [4] SHIRAKAWA A A, PHAM J M, JARRY P, et al. Design of FBAR filters at high frequency bands[J]. *International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering*, 2007, 17(1): 115-122.
- [5] 蔡飞达,李红浪,柯亚兵,等.考虑封装的 SAW 谐振式传感器仿真研究[J]. *压电与声光*, 2019, 41(1): 9-11.
CAI Feida, LI Honglang, KE Yabing, et al. Study on simulation of SAW resonant sensor considering packaging [J]. *Piezoelectrics & Acoustooptics*, 2019, 41(1): 9-11.
- [6] LI C Y, HSU H J, CHEN L S, et al. Investigation of characteristics of dual-band ladder-type surface acoustic wave for high-power durability duplexer [J]. *Sensors and Materials*, 2019, 31(2): 261-268.
- [7] 聂广琳,程红亚,汤劲松.基于 COM 参数提取技术设计 SAW 梯形滤波器[J]. *压电与声光*, 2008, 30(1): 3-5.
NIE Guanglin, CHENG Hongya, TANG Jinsong. Design SAW ladder-type filter based on COM parameters extracting [J]. *Piezoelectrics & Acoustooptics*, 2008, 30(1): 3-5.
- [8] 张显洪,李敏慧,李桦林.二端网络声表面波滤波器电磁仿真分析及设计[J]. *压电与声光*, 2021, 43(4): 490-493.
ZHANG Xianhong, LI Minhui, LI Hualin. Electromagnetic simulation analysis and design of two-terminal network surface acoustic wave filter [J]. *Piezoelectrics & Acoustooptics*, 2021, 43(4): 490-493.