

单端口声表面波谐振器在片去嵌方法分析

韩晓宇, 帅 垚, 吴传贵, 罗文博, 潘忻强, 张万里

(电子科技大学 电子薄膜与集成器件国家重点实验室, 四川 成都 611731)

摘要:为了准确地设计声表滤波器, 需要从参考声表面波(SAW)谐振器的测量值中提取精确的材料参数。测量 SAW 谐振器时, 单个谐振器无法直接进行测试, 需要引出传输线并使用 GSG 或 GS 探针进行测量, 消除传输线影响的去嵌入过程对于 SAW 谐振器材料参数的准确提取非常重要。该文介绍了几种声表面波谐振器的去嵌入技术, 包括 Open-Short 算法、电磁仿真方法、分段等效电路模型方法、集总参数等效电路法。通过实例验证了几种常用的去嵌方法并对其进行了解析。

关键词:去嵌入; SAW 谐振器; 机电耦合系数; 等效电路; 集总参数法

中图分类号:TN384; TN65 **文献标志码:**A

Analysis of On-Wafer De-Embedding Method for One-Port SAW Resonator

HAN Xiaoyu, SHUAI Yao, WU Chuangui, LUO Wenbo, PAN Xinqiang, ZHANG Wanli

(State Key Laboratory of Electronic Thin Films and Integrated Devices, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China)

Abstract: In order to accurately design the SAW filter, it is necessary to extract accurate material parameters from the measured values of the reference SAW resonator. When measuring the SAW resonator, a single resonator cannot be directly tested, and a transmission line is required to contact the probe for measurement. The process of removing the influence of the transmission line is very important for the accurate extraction of SAW resonator material parameters. In this paper, several de-embedding methods of SAW resonators are introduced, including Open-Short algorithm, electromagnetic simulation method, segmented equivalent circuit model method, lumped parameter equivalent circuit method, and several commonly used de-embedding methods are verified and analyzed with examples.

Key words: de-embedding; SAW resonator; electromechanical coupling coefficient; equivalent circuit; lumped parameter method

0 引言

在声表面波(SAW)滤波器的设计中, 通常利用衬底、压电基板和叉指电极来计算谐振器的声学 and 电学特性, 所以必须准确地识别材料属性, 改进滤波器的仿真, 使之更贴合于实际^[1]。材料属性可通过使用 SAW 谐振器的测量特性来提取, 但单个谐振器不能被测试, 测量需要引出 GND 电极和信号传输线到测量端口探针处, 谐振器的测量特性受传输线特性的影响, 准确提取材料特性需要去除金属互连线和 PAD 后的谐振器本身的特性。测试前, 通常需要用网络分析仪对探针及整套系统进行校准, 可以选择 TRL 或 SOLT 校准方式, 以消除系统产生的误差, 之后使用 GSG 探针进行测试结构的

测试。

目前可实际应用的片上去嵌方法主要分为两类: 第一种是较为成熟的 Open-Short 法, 主要包括设计对应的去嵌辅助测试结构, 求解寄生方程, 确定该算法的关系式^[2]。该方法也是目前国内片上系统应用最广泛的去嵌方法。第二种是根据各种不同的片上电路, 如片上的螺旋电感、电容、谐振器, 将电路内部的每个部分或者整体等效为寄生网络, 对每部分进行拟合, 反向推出准确的元器件材料参数^[3]。本文运用 4 种建模及去嵌手段对示例谐振器的去嵌进行分析:

- 1) Open-Short 算法对谐振器传输线去嵌。
- 2) 电磁场仿真工具对片上谐振器去嵌。

收稿日期: 2023-01-11

作者简介: 韩晓宇(1996-), 女, 河北省邯郸市人, 硕士生, 主要从事声表面波谐振器的制备及性能研究。帅垚(1983-), 男, 副教授, 博士, 主要从事声表面波和体声波滤波器的研究。

3) 运用分段的等效电路模型对片上谐振器去嵌处理。

4) 运用紧凑的集总参数模型对片上谐振器去嵌。

1 去嵌方法

本文进行分析的实例谐振器参数为:压电材料采用 42°Y-LiTaO_3 , 半周期为 $1.206\ \mu\text{m}$, 叉指对数为 200 对, 孔径为 $\varnothing 60.2\ \mu\text{m}$, 金属化率为 0.5, 电极厚度为 $180\ \text{nm}$ 。

1.1 Open-Short 去嵌算法

该方法是国内去嵌技术中一种较为成熟的方法, 需要用到待测器件的开路和短路结构。器件外围的寄生被直接视为并联寄生和串联寄生, 开路结构是将待测谐振器 (DUT) 去除, 短路结构是将 DUT 两端的金属互连线连接变为短路, 开路结构模拟的是测试结构中的容性寄生部分, 短路结构模拟的是测试结构中的感性寄生部分。图 1 为单端口谐振器测试结构和开路、短路的版图结构。

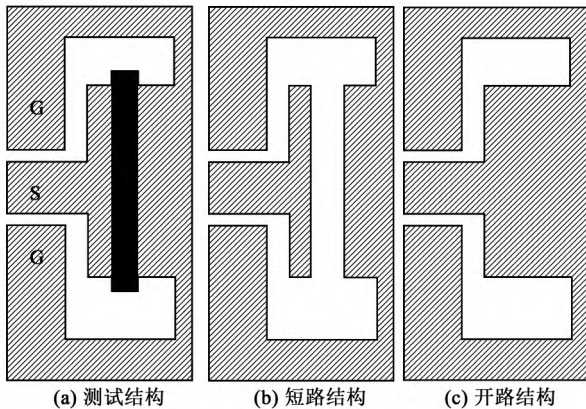


图 1 开短路及测试结构版图

该去嵌算法的具体步骤包括:

1) 对测试结构、open 去嵌结构、short 去嵌结构分别进行 S 参数测量, 分别得到 S_{mea} 、 S_{open} 及 S_{short} 。

2) 将 S_{mea} 、 S_{open} 、 S_{short} 分别转换为 Y 参数 Y_{mea} 、 Y_{open} 、 Y_{short} 。

3) 计算 $Y_{s-o} = Y_{\text{short}} - Y_{\text{open}}$, 将 Y_{s-o} 转换为 Z 参数 Z_{s-o} ; 计算 $Y_{m-o} = Y_{\text{mea}} - Y_{\text{open}}$, 将 Y_{m-o} 转换为 Z 参数 Z_{m-o} 。

4) 将 Z_{m-o} 与 Z_{s-o} 相减得到 DUT 的 Z 参数, 即 $Z_{\text{DUT}} = Z_{m-o} - Z_{s-o}$ 。将 Z_{DUT} 转换为 S 参数, 可得到 DUT 的 S 参数。

去嵌后的本征器件 Y 参数计算式^[4]为

$$Y_{\text{DUT}} = [(Y_{\text{DUT}} - Y_{\text{open}})^{-1} - (Y_{\text{short}} - Y_{\text{open}})^{-1}]^{-1} \quad (1)$$

利用该算法对示例谐振器进行去嵌, 去嵌前后的对比如图 2 所示。

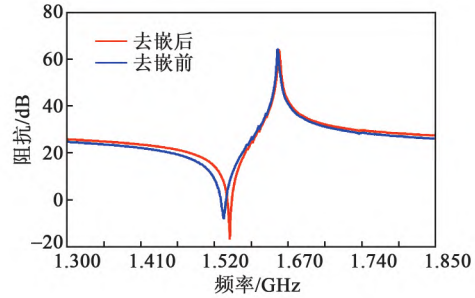


图 2 Open-Short 算法去嵌前后对比图

1.2 电磁场仿真工具对片上谐振器去嵌

如果应用普通的 Open-Short 算法或等效电路的方法, 则每个器件都需要特定的测试结构、open 去嵌结构、short 去嵌结构, 从而大量占用版图面积, 增加流片成本。目前工业界普遍采用的方法是: 仅对部分尺寸的去嵌结构进行流片, 同时利用电磁场仿真工具对相应的去嵌结构进行电磁仿真; 然后将测试结果与电磁仿真的结果进行比较, 通过调整仿真器中所设定的材料参数 (如电导率、介电常数等), 使电磁场仿真结果与测试结果一致, 获得与测试结果相吻合的仿真数据。以基于校准后的电磁场仿真数据来进行参数提取^[5]。图 3 为谐振器 open 与 short 结构在电磁仿真工具内的模型图, 上层为电极, 下层为衬底材料。图 4 为去嵌前后的阻抗对比曲线。其中去嵌后的阻抗曲线包含仿真器材料参数调整前后两部分。

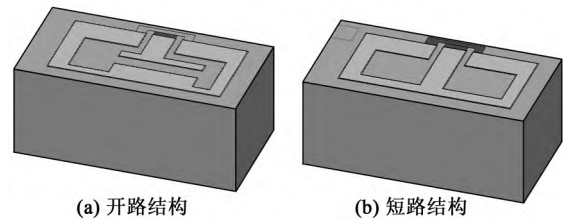


图 3 电磁仿真建模图

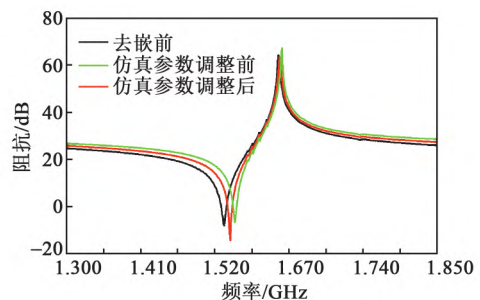


图 4 电磁仿真去嵌前后对比图

2 去嵌方法比较与结果讨论

为了评价上述方法的去嵌效果,采用 4 种去嵌方式对示例谐振器进行对比。图 10 为采用 4 种去嵌方法去嵌前后的对比图。表 1 为不同去嵌方法结果对比。阻抗比为反谐振点 f_p 对应的阻抗值减谐振点 f_s 对应的阻抗值,其中 f_p 为谐振器的反谐振点频率, f_s 为谐振器的谐振点频率,机电耦合系数 K_t^2 为

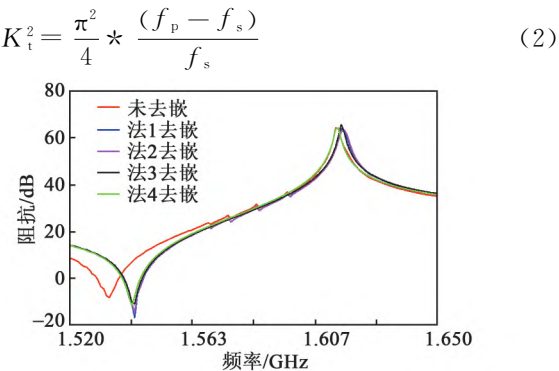


图 10 4 种去嵌方法结果对比

表 1 不同去嵌方法结果对比

不同方式	f_s /MHz	f_p /MHz	K_t^2 /%	阻抗比/ dB
未去嵌	1 534	1 614	12.8	72.7
算法去嵌	1 543	1 616	11.6	81.0
仿真去嵌	1 543	1 617	11.8	78.2
分段等效电路去嵌	1 543	1 616	11.6	76.9
集总等效电路去嵌	1 542	1 614	11.5	75.6

由表 1 可以看出,无论采用哪种去嵌方法,去嵌前后的差别都是巨大的,谐振点的频率可以相差 10~11 MHz,所以在设计前必须消除测试结构上寄生参数的影响,提取准确的谐振器参数。由于传输线的杂散电容,去嵌前后的机电耦合系数从 12.8% 变为 11.6%。整体传输线引入的寄生参数导致去嵌后的品质因数(Q)值变差。

由表 1 可知,4 种方法去嵌后的谐振频率与反谐振频率相差不大,机电耦合系数几乎一致。Open-Short 算法理论较完善,可以达到阻抗比为 81 dB 的较理想状况,但需要每个谐振器流片对应的测试结构,占用版图的面积。运用电磁仿真可以有效规避此缺点,前期需要流片测试结构来调整仿真器的参数。后两种集总参数方法在本质上一样,只是

一个将电路分段等效,另一个整体等效。同时,分段等效电路去嵌方法无论在频率还是阻抗比上都更准确,由于 Open、Short 结构并不能简单地等效为 3 个元素组成的等效网络,因此,整体集总参数去嵌的等效方式准确性有待考究。

3 结束语

本文介绍了 4 种基于片上声表面波谐振器的去嵌方法,包括 Open-Short 算法、电磁仿真方法及两种等效电路方法。运用实例对 4 种方法进行分析,验证了几种去嵌方法无明显区别,并分析了每种方法的优劣势。其中 Open-Short 算法和分段等效电路的方法较为简单且准确,后续的研究也会采用该方法进行谐振器的去嵌。

参考文献:

[1] YAMADA T, URIU K, JIBU T, et al. High-accuracy modeling method for transmission line on surface acoustic wave substrates[J]. Electronics and Communications in Japan, 2009, 92(2): 49-55.

[2] 王全,刘林林,冯悦怡.射频器件在片测试结构与去嵌入方法[J].集成电路应用, 2019, 36(8): 3. WANG Quan, LIU Linlin, FENG Yueyi. On-wafer probing structures of radio frequency device and de-embedding approaches[J]. Integrated Circuit Application, 2019, 36(8): 3.

[3] WU H, CAI X, WU Y, et al. An investigation on extraction of material parameters in longitudinal mode of FBAR[J]. Circuits and Systems II: Express Briefs, IEEE Transactions on, 2020, 67(6): 1024-1028.

[4] 刘念宏.毫米波集成电路片上传输线和螺旋电感建模提参研究[D].北京:清华大学, 2018.

[5] 张必壮,唐小龙,蒋平英,等.薄膜体声波谐振器 Mason 模型参数的提取方法[J].压电与声光, 2022, 44(2): 215. ZHANG Bizhuang, TANG Xiaolong, JIANG Pingying, et al. Extraction method of mason model parameters of thin film bulk acoustic resonator[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2022, 44(2): 215.

[6] XU H, KASPER E. A de-embedding procedure for one-port active mm-wave devices[C]//New Orleans, LA, USA; 2010 Topical Meeting on Silicon Monolithic Integrated Circuits in RF Systems (SiRF), 2010: 37-40.