

# 基于 SAW 滤波器的电磁寄生提取

胡月<sup>1,2</sup>, 白凤<sup>1,2</sup>, 周艺蒙<sup>1,2</sup>, 范维<sup>3</sup>, 魏子杰<sup>3</sup>, 李沛然<sup>3</sup>,  
帅垚<sup>2,3</sup>, 吴传贵<sup>2,3</sup>, 罗文博<sup>2,3</sup>, 潘忻强<sup>2,3</sup>, 张万里<sup>2,3</sup>

(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:**针对封装管壳和版图电磁寄生参数导致射频声表面波(SAW)滤波器通带变窄及驻波增大等问题,提出一种能快速提取封装管壳和版图中电磁寄生效应的方法,精准模拟了封装和版图对滤波器性能的影响。首先利用有限元法(FEM)电磁仿真软件提取封装管壳的电磁寄生参数,再使用电路仿真软件将所设计出的滤波器结合所提取的封装寄生参数和滤波器版图直接进行联合仿真,此方法不需将版图在 FEM 软件中再次进行电磁仿真,可提高时间利用率。此方法在中心频率为 1 268 MHz、通带插入损耗小于 1 dB、带内驻波小于 1.6、带内波动为 0.5 dB、带宽为 24 MHz(相对带宽为 1.8%)的 SAW 滤波器上进行了验证,结果表明仿真结果与实测值吻合度较高。该设计中所用的 SAW 谐振器均经过去嵌操作,能更精准地模拟实测滤波器的结果。

**关键词:**电磁寄生; SAW 滤波器; 封装; 去嵌; 版图

**中图分类号:** TN384 **文献标识码:** A

## Electromagnetic Parasitic Extraction Based on SAW Filter

HU Yue<sup>1,2</sup>, BAI Feng<sup>1,2</sup>, ZHOU Yimeng<sup>1,2</sup>, FAN Wei<sup>3</sup>, WEI Zijie<sup>3</sup>, LI Peiran<sup>3</sup>,  
SHUAI Yao<sup>2,3</sup>, WU Chuangui<sup>2,3</sup>, LUO Wenbo<sup>2,3</sup>, PAN Xinqiang<sup>2,3</sup>, ZHANG Wanli<sup>2,3</sup>

(1. College of Optoelectronic Engineering, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China;  
2. Chongqing Institute of Microelectronics Industry Technology, University of Electronics Science and Technology of China,  
Chongqing 401332, China; 3. School of Electronics Science and Engineering, University of Electronics Science  
and Technology of China, Chengdu 611731, China)

**Abstract:** Considering the electromagnetic parasitic parameters of the encapsulated tube shell and layout, the passband of an RF surface acoustic wave (SAW) filter narrows, and the standing wave increases. This paper proposes a method to quickly extract the electromagnetic parasitic effects in the package shell and layout and accurately simulate their influence on filter performance. First, FEM electromagnetic simulation software was used to extract the electromagnetic parasitic parameters of the encapsulated tube shell. Then, circuit simulation software was employed to co-simulate the designed filter with the extracted packaging parasitic parameters and filter layout. This approach eliminates the need for repeated electromagnetic simulations in FEM software, improving time efficiency. The method was verified on a SAW filter with a center frequency of 1 268 MHz, a passband insertion loss of less than 1 dB, an in-band standing wave of less than 1.6, an in-band fluctuation of 0.5 dB, and a bandwidth of 24 MHz (relative bandwidth of 1.8%). The SAW resonators used in this design were de-embedded, allowing for more accurate simulation of the measured filter results.

**Key words:** electromagnetic parasitic; SAW filter; encapsulation; go embedded; territory

## 0 引言

声表面波(SAW)滤波器因体积小,质量轻,易制备等优点被广泛应用于射频前端模组中<sup>[1]</sup>。随着

通信技术的迅速发展,为应对复杂多变的工作环境,部分 SAW 滤波器采用特定封装,但会引入额外的电磁寄生。在射频频段中,随着 SAW 器件尺寸

收稿日期:2024-01-30

基金项目:四川省科技计划基金资助项目(2020YFJ0002)

作者简介:胡月(1998-),女,河南省南阳市人,硕士生。帅垚(1983-),男,副教授,博士。

的减小,封装电磁寄生对器件性能的影响更明显<sup>[2]</sup>。电磁寄生效应导致滤波器通带偏移、带宽变窄及带内波动增加等问题,导致滤波器设计难度增大,且与实际流片结果差距较大。本文基于耦合模(COM)模型搭建 SAW 滤波器电路,利用有限元法(FEM)电磁仿真软件计算封装结构和键合线的电磁寄生参数,通过使用电路仿真软件对滤波器电路-管壳封装-版图进行电磁仿真。最终解决寄生参数对滤波器性能的影响。

## 1 寄生参数提取

### 1.1 SAW 谐振器去嵌

耦合模(COM)理论是研究 SAW 谐振器的重要理论方法之一<sup>[3]</sup>,本文利用 COM 模型与谐振器实测数据进行拟合,得到谐振器的阻抗响应曲线。由于实际测量 SAW 谐振器的阻抗参数时受测试结构中金属互连线的影响,引入了额外的寄生参数。因此,在设计 SAW 滤波器前需对谐振器进行去嵌,提前去除测试结构金属互连线对其阻抗参数的影响<sup>[4]</sup>,使其仿真数据更贴合真实的流片结果。本文所用谐振器均通过紧凑的集总参数模型进行去嵌处理。

图 1(a)、(b)分别为单端口谐振器的 GSG 测试结构开路和短路版图。图 1(c)、(d)分别为图 1(a)、(b)所对应集总参数模型中开路及短路等效电路。图 1(a)中, $C_{\text{open}}$  为开路结构中的开路电容,因为开路 GSG 结构中两块金属间的间距较小,且版图金属截面平行,在施加电压后将累积电荷形成电容。图 1(b)中, $R_{\text{short}}$ 、 $L_{\text{short}}$  分别为短路结构中红色部分的电阻和电感。图 1(c)、(d)中, $C_0$  为 G、S 的寄生电容总值, $R_0$ 、 $L_0$  分别为开路和短路结构版图中外部测试框的等效电阻和电感,通过对版图 1(a)、(b)流片后的阻抗实测数据进行拟合获得上述参数值。

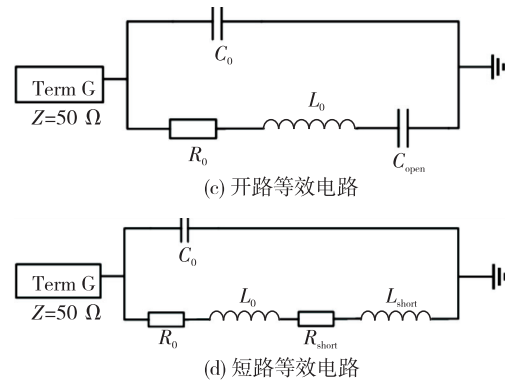
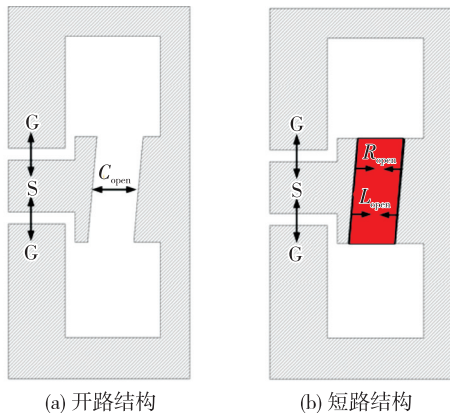


图 1 单端口谐振器开/短路版图及其等效电路

由图 2(b)可看出,GSG 间的电容  $C_0$ 、汇流条电阻  $R_0$ 、汇流条电感  $L_0$  均通过拟合获得,通过图 2(b)中的等效电路和图 2(a)版图的实测数据进行拟合可得到去嵌后的谐振器“SAW”的数据。去嵌前后谐振器阻抗参数对比如图 3 所示。由图可知,去嵌前谐振器的谐振频率  $f_{r1}$  为 1 274 MHz,去嵌后谐振器的谐振频率  $f_{r2}$  为 1 279 MHz,反谐振频率均为 1 337 MHz。

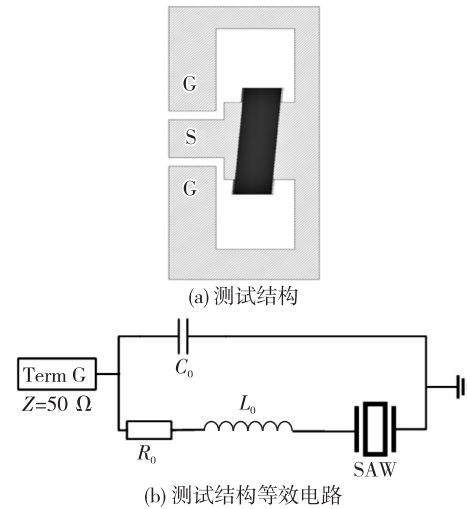


图 2 单端口谐振器测试结构版图及其等效电路

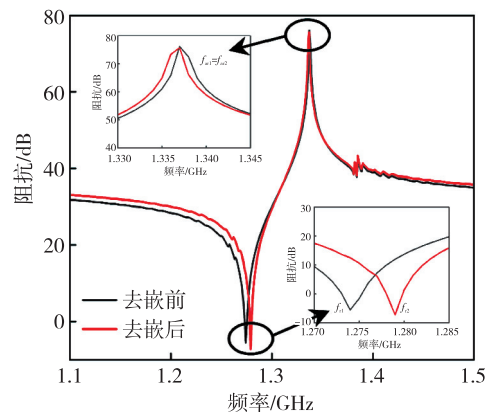


图 3 谐振器去嵌前后结果对比

## 1.2 封装的电磁寄生参数提取

本文采用  $3\text{ mm} \times 3\text{ mm}$  表面贴片器件(SMD)封装管壳,根据实际封装在 FEM 软件中建立 1:1 仿真模型。设管壳中金属导体材料为镍,绝缘体材料为有机陶瓷,其介电常数为 10。设键合线材料为铝,左右各 5 根并对称排布,其中输入、输出信号键合线各 1 根,接地键合线 1 组 2 根,共 4 组,并将实际截面为圆柱形的铝丝抽象为六棱柱建模,以便计算。在环境设置方面,根据器件在印制电路板上的实际工作情况,将封装管壳电磁模型建于共面波导评估板上。图 4 为在 FEM 电磁仿真软件搭建管壳模型。

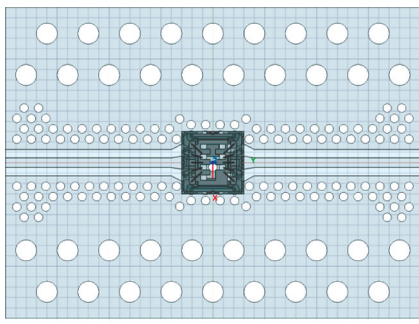
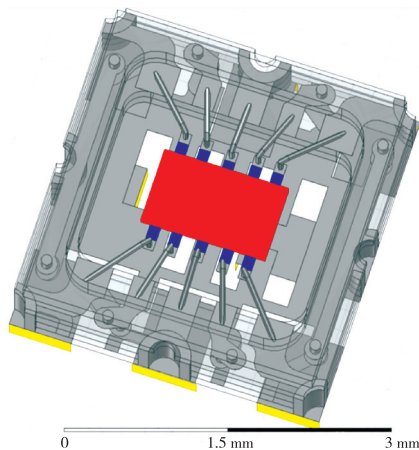
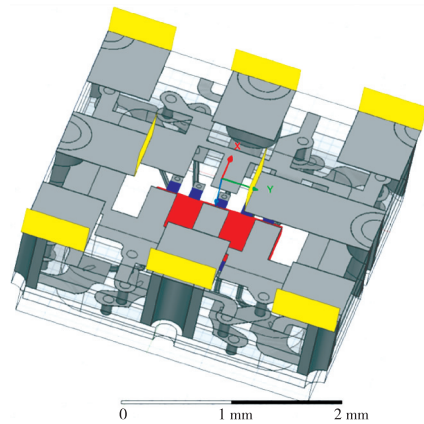


图4 封装管壳的3D模型

为获取封装管壳在特定频率下的电磁寄生,仿真时采用集总端口激励求解。对输入输出两侧的键合线设置集总端口,同时对管壳的输入、输出接口及管壳封装接地设置集总端口<sup>[5]</sup>。图5为封装管壳集总端口求解设置。图5(a)中,红色区域为压电衬底的理想导体,蓝色区域设置为键合线的集总端口。图5(b)中,黄色区域为管壳的输入、输出端口及封装接地的集总端口。通过此方法可直接获得单管壳的电磁寄生参数,同时此方法可提取其余模型管壳的电磁寄生参数。



(a) 键合线集总端口



(b) 接地和输入输出集总端口

图5 封装集总端口扫频设置

## 1.3 版图的电磁仿真

传统方法用 COM 模型仿真时只能计算滤波器拓扑电路本身的阻抗参数,未考虑用于连接的金属线的电磁寄生。本文采用版图绘制软件根据滤波器电路拓扑结构绘制 1:1 的版图模型,如图 6 所示。

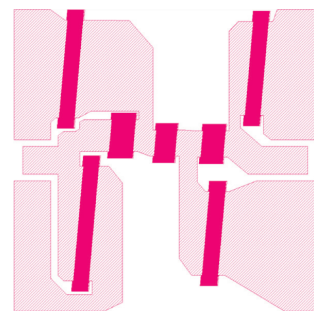


图6 滤波器版图

将去除谐振器的叉指结构和反射栅的版图代入电路仿真软件中,并在谐振器连接处设置端口。设电极材料为铝铜合金,并设置用于外接激励和谐振器之间的连接端口,如图 7 所示。电磁仿真后可以获得版图的电磁寄生参数。此方法需要在仿真器中设定准确的材料参数(如电导率、介电常数、热熔值等)。

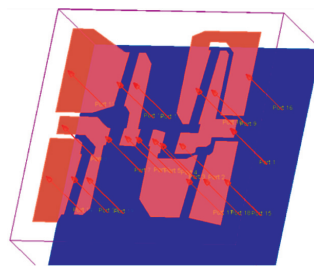


图7 梯形 SAW 版图 EM 设置

## 1.4 电路-封装-版图联合仿真

### 1.4.1 方法一

在电路仿真软件中代入管壳的 S 参数结合



SAW 滤波器拓扑结构进行仿真,确定好滤波器的各项参数,再代入第 1.3 节中,对得到的芯片版图 EM 仿真结果进行电路-封装-版图级联,实现声学-电磁联合仿真,如图 8 所示。该方法可直接在该联合仿真中微调谐振器的孔径、半周期、叉指对数和反射栅对数等。

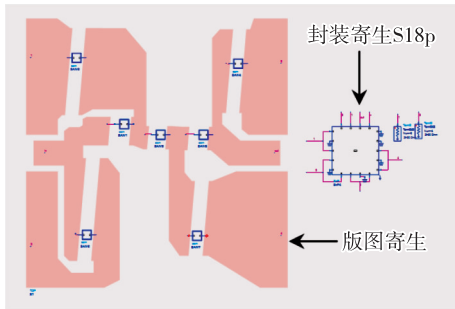


图 8 电声-电磁联合仿真图

#### 1.4.2 方法二

传统的联合仿真是在电路仿真软件中结合第 1.2 节提取的封装寄生参数和滤波器拓扑电路进行计算,然后把所得版图代入 FEM 仿真软件中,计算版图的电磁寄生效应,再代入电路仿真软件中改进 SAW 谐振器参数和对应的版图,重复操作直到滤波器性能符合需求。对版图的 FEM 电磁仿真如图 9 所示。在第 1.2 节 FEM 软件中的封装模型基础上,导入滤波器版图并去除谐振器叉指部分,设置版图为厚  $2\text{ }\mu\text{m}$  的铝,对版图谐振器的部分设置内部电路端口,方向由低电位指向高电位,匹配所有端口均为  $50\text{ }\Omega$ 。同时对模型进行网格剖分,设置自由三角形网格大小为  $\lambda/4$  ( $\lambda$  为波长)。设置扫频范围为  $0.5\sim 3\text{ GHz}$ 。最终提取到在考虑封装和版图电磁寄生时的 SAW 滤波器损耗( $S$  参数)文件。

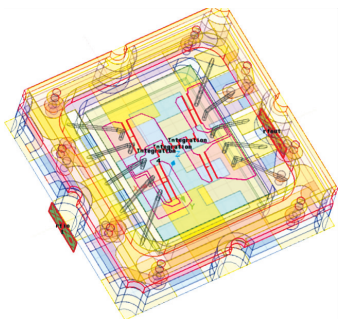
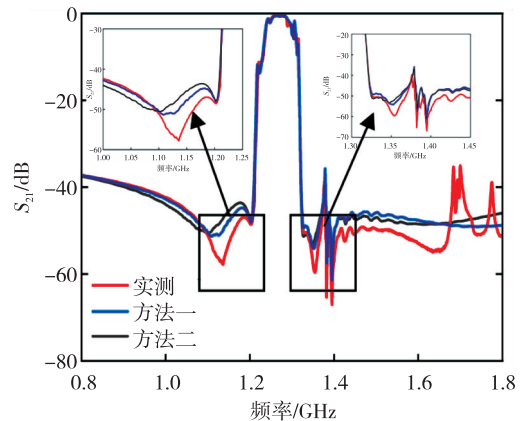


图 9 封装和版图的电磁仿真

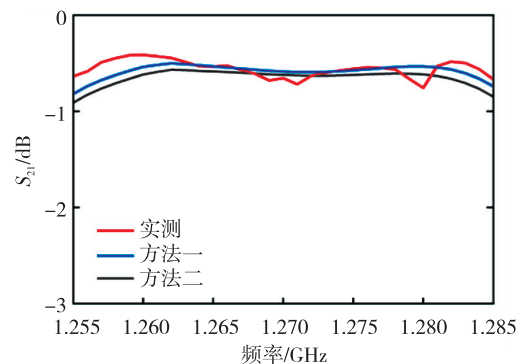
## 2 实验结果对比

将滤波器制作于  $42^\circ\text{Y-X LiTaO}_3$  衬底上,并进行封装测试。实测结果显示,通带中心频率为

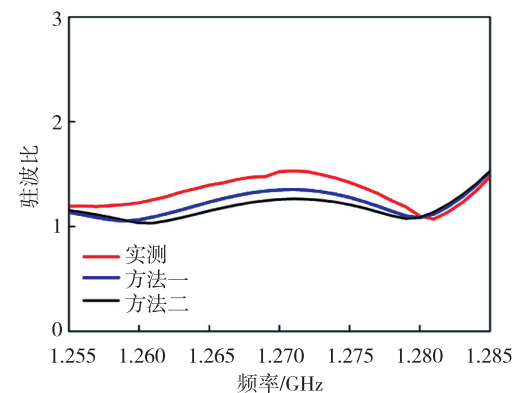
$1\text{ }268\text{ MHz}$ ,通带内驻波比最大值为  $1.6$ ,最小插入损耗为  $-0.718\text{ dB}$ ,带内波动为  $0.5\text{ dB}$ ,带宽为  $24\text{ MHz}$  (相对带宽为  $1.2\%$ ),带外抑制优于  $-35\text{ dB}$ 。图 10 为两种方法的电声-电磁联合仿真结果与封装实测结果对比。为了保证方法一、方法二和实测数据对比的真实性,两种方法所涉及的滤波器数据均相同。由图 10 可见,封装测试结果与联合仿真设计值吻合较好,证明了两种方法提取 SAW 滤波器封装和版图寄生参数的可行性。经实验验证,方法一在仿真流程时间和计算时间上比方法二更优。



(a) 联合仿真与封装实测数据阻抗响应曲线对比



(b) 联合仿真与封装实测数据带内损耗对比



(c) 联合仿真与封装实测结果带内驻波比对比

图 10 联合仿真与封装实测数据对比

### 3 结束语

在高频下,封装和版图的电磁寄生会影响SAW滤波器性能。本文单独提取出封装管壳的电磁寄生S参数,再对版图进行EM仿真。最终建立包含封装和版图电磁寄生参数的电声-电磁联合仿真,以此方法解决电磁寄生对滤波器性能的影响(见文中的方法一)。该方法可以精准快速地计算出封装和版图的寄生效应,在联合仿真时版图随谐振器参数微调发生的改变可忽略不计。

### 参考文献:

- [1] 叶韬,金浩,董树荣,等. 无线无源声表面波传感器研究进展[J]. 传感器与微系统, 2014, 33(12): 1-4.  
YE Tao, JIN Hao, DONG Shurong, et al. Research progress of wireless passive surface acoustic wave sensor [J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2014, 33(12): 1-4.
- [2] LIN S H, LIN K H, CHIU S C, et al. Full wave simulation of SAW filter package and SAW pattern inside package[C]//S. l.: 2003 IEEE Symposium on Ultrasonics, 2003: 2089-2092.
- [3] HSAHIMOTO K Y. 声表面波器件模拟与仿真[M]. 北京:国防工业出版社, 2002: 218-242.
- [4] 韩晓宇, 帅垚, 吴传贵, 等. 单端口声表面波谐振器在片去嵌方法分析[J]. 压电与声光, 2023, 45(3): 342-345.  
HAN Xiaoyu, SHUAI Yao, WU Chuangui, et al. Analysis of on-wafer de-embedding method for one-port SAW resonator[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2023, 45(3): 342-345.
- [5] 黄小东, 黄玮, 魏勇平, 等. 电磁寄生参数在高频SAW滤波器设计中的应用[J]. 压电与声光, 2022, 44(5): 687-690.  
HUANG Xiaodong, HUANG Wei, WEI Yongping, et al. Application of parasitic parameters to design of high frequency SAW filter[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2022, 44(5): 687-690.
- (上接第452页)
- [11] TAKAI T, IWAMOTO H, TAKAMINE Y, et al. Incredible high performance SAW resonator on novel multi-layerd substrate[C]//Tours, France: 2016 IEEE International Ultrasonics Symposium(IUS), 2016: 1-4.
- [12] INOUE S, SOLAL M. LT/Quartz layered SAW substrate with suppressed transverse mode generation[C]//Las Vegas, NV, USA: 2020 IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS), 2020: 1-4.
- [13] HAUS H A, WANG K L. Modes of grating waveguide [J]. J Appl Phys, 1978, 49(3): 1061-1069.
- [14] HAUS H A. Modes in SAW grating resonators [J]. Journal of Applied Physics, 1977, 48(12): 4955-4961.
- [15] HIROTA K, NAKAMURA K. Analysis of SAW grating waveguides using 2-D coupling-of-modes equations [C]//Atlanta, GA, USA: Proceedings of the 2001 IEEE Ultrasonics Symposium, 2001: 115-120.
- [16] HIROTA K, NAKAMURA K. Analysis of SAW grating waveguides considering velocity dispersion caused by reflectivity [C]//Tahoe, NV, USA: Proceedings of the 1999 IEEE Ultrasonics Symposium, 1999: 221-226.
- [17] HASHIMOTO K Y, OMORI T, AHN C J. Extension of scalar potential formalism for transverse mode analysis of surface acoustic wave resonators [C]//Orlando, FL, USA: 2011 IEEE International Ultrasonics Symposium, 2011: 333-336.
- [18] KOZLOV A V, MOZHAIEV V G, ZYRYANOVA A. Waveguide effect under 'antiguinding' conditions in graded anisotropic media [J]. Journal of Physics: Condensed Matter, 2010, 22(7): 075401.
- [19] 陈正林, 赵雪梅, 贺艺, 等. 基于有限元分层级联技术SAW滤波器精确计算[J]. 压电与声光, 2022, 44(2): 234-237.  
CHEN Zhenglin, ZHAO Xuemei, HE Yi, et al. Precise calculation of SAW filter based on finite element hierarchical cascading technique [J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2022, 44(2): 234-237.
- [20] 赵雪梅, 郑泽渔, 白涛, 等. 基于分层级联技术的梯形声表面波滤波器正向设计[J]. 压电与声光, 2023, 45(1): 1-5.  
ZHAO Xuemei, ZHENG Zeyu, BAI Tao, et al. Forward design of ladder surface acoustic wave filter based on hierarchical cascading technique [J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2023, 45(1): 1-5.
- [21] 肖强. 声表面波应变敏感单元建模方法与横向模抑制研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2021.
- [22] 郑泽渔, 杜雪松, 董加和, 等. 基于有限元法和色散COM模型的声表面波滤波器联合仿真[J]. 压电与声光, 2023, 45(2): 165-168.  
ZHENG Zeyu, DU Xuesong, DONG Jiahe, et al. Co-simulation of surface acoustic wave filter based on finite element method and dispersive COM mode [J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2023, 45(2): 165-168.