

# 基于 COM-MBVD 混合模型的多模态声学响应研究与仿真

周艺蒙<sup>1,2</sup>, 陈抒键<sup>3</sup>, 蒋冠臻<sup>3</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:**耦合模(COM)模型广泛应用于声表面波(SAW)滤波器设计中,传统的单模 COM 模型不能拟合到远端的高阶水平剪切波、西沙瓦波等杂散模态。从单模 COM 模型出发,结合类似于 MBVD 等效电路的谐振支路,实现 COM-MBVD 模型拟合多模态声学响应。并基于此模型搭建 8 阶梯形结构电路进行优化仿真。最终设计出中心频率为 1 590 MHz,通带插入损耗小于 1.6 dB,带内波动为 1 dB,带宽为 80 MHz(相对带宽为 5%)的声表面波(SAW)滤波器。实际测试数据与仿真数据相符,验证了该设计方法的可行性。

**关键词:**COM 模型;MBVD 模型;梯形结构;SAW 滤波器

**中图分类号:**TN384 **文献标识码:**A

## Research and Simulation of Multi-Modal Acoustic Response Based on COM-MBVD Hybrid Modeling

ZHOU Yimeng<sup>1,2</sup>, CHEN Shujian<sup>3</sup>, JIANG Guanzhen<sup>3</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:** The coupling-of-modes (COM) model is extensively used in the design of surface acoustic wave (SAW) filters. However, the conventional single-mode COM model is insufficient for accounting for spurious modes, such as higher-order horizontal shear waves and Sezawa waves at the far end. In this study, we first used the single-mode COM model and integrated it with a resonant branch similar to the MBVD equivalent circuit to establish the COM-MBVD model for accommodating the multi-modal acoustic response. Subsequently, an 8th-order ladder structure circuit was constructed for optimization simulation, following this model. The final configuration resulted in a SAW filter with a central frequency of 1 590 MHz, a passband insertion loss below 1.6 dB, an in-band fluctuation of 1 dB, and a bandwidth of 80 MHz (equivalent to a relative bandwidth of 5%). The alignment between the test and simulation data confirms the viability of the design approach.

**Key words:** COM model; MBVD model; ladder structure; SAW filter

### 0 引言

声表面波(SAW)滤波器由于小尺寸和高阻抗等优点,被广泛应用于无线通信射频前端的模组中。SAW 滤波器设计技术的关键在于对谐振器的

精准模拟和快速仿真优化。SAW 谐振器可以通过近似唯象的 COM 模型,快速得到谐振器的阻抗频率响应曲线。但普遍使用的 COM 模型只是在  $\delta$  模型的基础上仅考虑二阶级效应和体声波(BAW)效

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:周艺蒙(1999-),男,四川省广安市人,硕士生。帅垚(1983-),男,副教授,博士。

应对声表面波传播的影响<sup>[1]</sup>,无法拟合到远端的其他模态,如高阶水平剪切波、西沙瓦尔波,导致实际加工出的滤波器在远端干扰到其他频段。为了精准拟合谐振器实测数据,本文使用类似于 MBVD 的谐振支路拟合其他杂散模态,结合 COM 基本模实现多模态声学谐振器拟合模型。利用谐振器实测数据验证了该模型的准确性,并根据此模型设计了一款梯形 SAW 滤波器。

## 1 耦合模(COM)模型扩展

### 1.1 耦合模(COM)模型基本原理

COM 模型来源于对波在周期性结构中传播的分析。基于简单、快捷等特点用于复杂结构的内部设计优化。在声表面波器件中,周期性电极位于压电材料表面,属于周期性质量加载,通常利用负载波动方程进行分析<sup>[2]</sup>。COM 模型考虑了二阶效应及体声波效应对声表面波传播特性的影响,能够高效准确地模拟主模态的导纳响应。图 1 为基于叉指电极(IDT)的 COM 模型图。

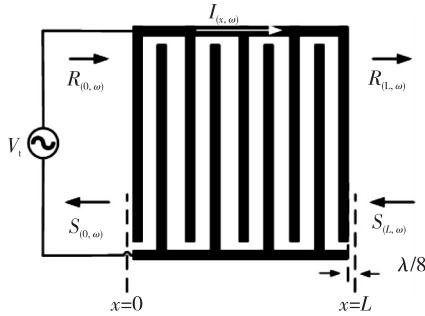


图 1 叉指电极 COM 坐标图

设叉指电极(IDT)的半周期为  $p$ ,在 IDT 两端加入频率为  $f$  的电压  $V$ ,坐标  $x$  处产生电流为  $I(x, \omega)$ ,  $R(x, \omega)$ 、 $S(x, \omega)$  分别为正方向和负方向传播的波分量<sup>[3]</sup>。在考虑传播损耗( $\gamma$ )、电极反射( $\kappa$ )、电极电阻( $R_i$ )、分布电容( $C$ )和换能系数( $\alpha$ )等效后可得:

$$\begin{cases} \frac{dR(x)}{dx} = -j\beta_d R(x) + j\kappa S(x) + j\alpha V \\ \frac{dS(x)}{dx} = -j\kappa^* R(x) + j\beta_d S(x) - j\alpha^* V \\ \frac{dI}{dx} = -2j\alpha^* R(x) - 2j\alpha S(x) + j\omega CV \end{cases} \quad (1)$$

其中失谐系数  $\beta_d$  为

$$\beta_d = \frac{2\pi f}{v} - \frac{\pi}{p} - j\gamma \quad (2)$$

整个方程组的解是齐次通解和非齐次通解的叠加,需满足边界条件:

$$\begin{cases} R(0, \omega) = R_l(\omega) \\ S(L, \omega) = S_r(\omega) \\ I(L, \omega) = 0 \end{cases} \quad (3)$$

利用  $\mathbf{P}$  矩阵求导 SAW 谐振器导纳时,可将 SAW 谐振器分成反射栅区、叉指换能区和间隙区 3 个区域,利用  $\mathbf{P}^g$ 、 $\mathbf{P}^{\text{idt}}$ 、 $\mathbf{P}^{\text{gap}}$  分别表示反射栅区域、叉指换能区、间隙区的  $\mathbf{P}$  矩阵,谐振器的结构示意图如图 2 所示。

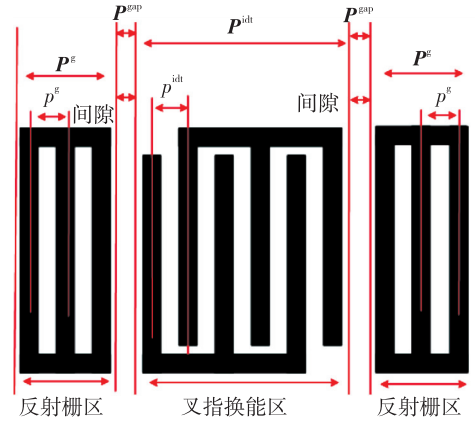


图 2 谐振器结构示意图

利用  $\mathbf{P}$  矩阵进行分析 SAW 谐振器时,设置激励电压为  $V$ ,生成的电流为  $I$ ,则  $\mathbf{P}$  矩阵为

$$\begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ I \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{21} & P_{13} \\ P_{21} & P_{22} & P_{23} \\ P_{31} & P_{32} & P_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ V \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中:  $P_{11}$ ,  $P_{12}$ ,  $P_{21}$ ,  $P_{22}$  表示声波参数;  $P_{13}$ ,  $P_{23}$ ,  $P_{33}$  表示换能相关参数;  $a_1$ ,  $a_2$  表示谐振器一侧的入射声波和反射声波振幅;  $b_1$ ,  $b_2$  表示谐振器另一侧的声表面波振幅。

首先确定 IDT 及反射栅的几何参数(如半周期  $p$ 、孔径  $W$ 、叉指对数  $N$  等),根据负载波动方程求解得到声学 COM 参数,分别求解出对应 IDT 区、间隙区及反射栅区的  $\mathbf{P}$  矩阵。最终根据级联关系得到谐振器的导纳<sup>[4]</sup>为

$$Y = P_{33} - \frac{4 \cdot R \cdot P_{13}^2}{1 - R(P_{11} + P_{12})} \quad (5)$$

式中  $R = (P_{12}^{\text{gap}})^2 P_{11}^g, P_{12}^{\text{gap}}, P_{11}^g$  分别表示间隙区和反射栅区的声波参数。图 3 为基础单模 COM 模型拟合谐振器阻抗曲线。

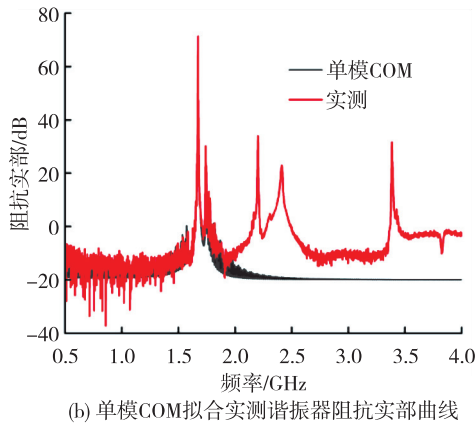
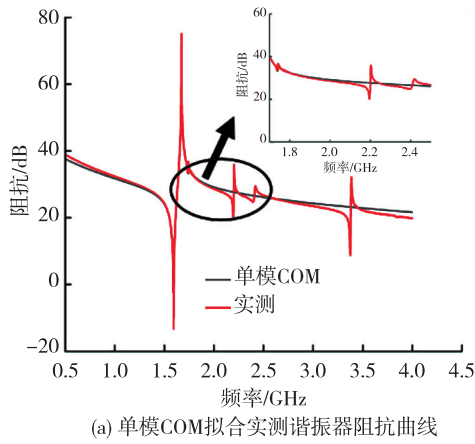


图3 单模 COM 模型拟合谐振器

## 1.2 多模 COM-MBVD 模型及仿真研究

单模 COM 模型基于 Floquet 理论, 仅能描述两个性质相同的反向声表面波, 忽略了高阶模态, 只考虑了主模和主模附近的弱耦合情况。不能计算模拟远端的杂散模态。因此, 本文采用 MBVD 等效谐振支路拟合其余声学模态, 扩充 COM 模型使用范围。MBVD 等效电路模型由 BVD 模型改进而来, 加入了介质损耗  $R_0$  和电极欧姆损耗  $R_s$ , 图4为 MBVD 等效电路模型, 其中,  $R_m$ 、 $L_m$ 、 $C_m$  分别为动态电阻、电容、电感。

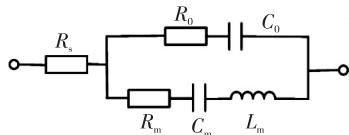


图4 MBVD 等效模型

对于某一基片上固定结构的谐振器, 静态电容  $C_0$  不受震动模态的影响<sup>[5]</sup>。因此, 激励多个声学模态的谐振器在建立 COM-MBVD 模型时仅需固定  $C_0$ , 通过增加  $R_m L_m C_m$  谐振支路实现杂散模态的拟合<sup>[6]</sup>。一个  $R_m L_m C_m$  支路表示一个杂散谐振模态, 包含一个串联谐振和并联谐振。图5为 COM-

MBVD 多模模型。

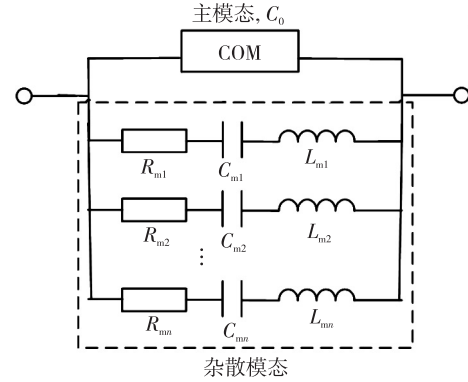


图5 COM-MBVD 等效模型

首先基于主模态的 COM 参数获得归一化电容  $C_n$ , 由归一化电容  $C_n$  计算出一定尺寸谐振器的静态电容  $C_0$  为

$$C_0 = \frac{WNC_n}{2p} \quad (6)$$

在确定需要结合的杂散模态个数后, 利用仿真软件 COMSOL 仿真计算出所有杂散模式的声速  $v_n$ 、机电耦合系数  $k_{\text{eff}, \eta}^2$  及品质因数  $Q_n$  等参数。假设多模 COM-MBVD 模型需要拟合  $n$  个声学杂散模态, 并计算出第  $\eta$  个模态的反谐振频率声速为  $v_{\eta a}$ , 对应的机电耦合系数为  $k_{\text{eff}, \eta}^2$  及该模态的谐振点品质因数值为  $Q_{\eta r}$ 。可以结合谐振器的尺寸参数计算出第  $\eta$  个 RCL 支路的参数  $R_{m\eta}$ 、 $L_{m\eta}$ 、 $C_{m\eta}$ 。第  $\eta$  个模态的谐振频率  $f_{\eta r}$  和反谐振频率  $f_{\eta a}$  分别为

$$f_{\eta a} = 2v_{\eta a}P \quad (7)$$

$$f_{\eta r} = f_{\eta a} \left( 1 - \frac{4k_{\text{eff}, \eta}^2}{\pi} \right) \quad (8)$$

根据式(7)、(8)可计算出第  $\eta$  个谐振支路的电容比  $\Gamma_{\eta}$  为

$$\Gamma = \left[ \prod_{\eta=1}^n \left( \frac{f_{\eta a}}{f_{\eta r}} \right)^2 - 1 \right]^{-1} \quad (9)$$

$$\Gamma_{\eta} = (1 + \Gamma - 1) \frac{\prod_{m=1}^n (1 - f_{\eta r}^2 / f_{ma}^2)}{\prod_{p=1, p \neq \eta}^n (1 - f_{\eta r}^2 / f_{pr}^2)} \quad (10)$$

根据第  $\eta$  个谐振支路的电容比  $\Gamma_{\eta}$  可得:

$$L_{m\eta} = (4\pi^2 f_{\eta r}^2 C_{m\eta})^{-1} \quad (11)$$

$$C_{m\eta} = \frac{C_0}{\Gamma_{\eta}} \quad (12)$$

$$R_{m\eta} = \frac{2\pi f_{\eta r} L_{m\eta}}{Q_{\eta}} \quad (13)$$

计算出第  $\eta$  个 RCL 支路的参数  $R_{m\eta}$ 、 $L_{m\eta}$ 、 $C_{m\eta}$  值后,利用仿真软件 ADS 搭建 COM-MBVD 混合模型。图 6 为拟合 3 个杂散模态的 COM-MBVD 封装模型。图中,  $bw\_n = (f_{na} - f_{nr})/f_{na}$  表示第  $n$  个谐振响应的“相对带宽”。

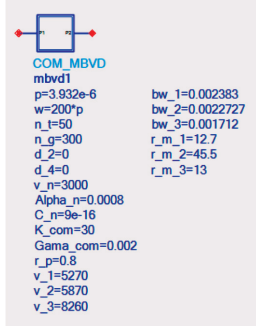
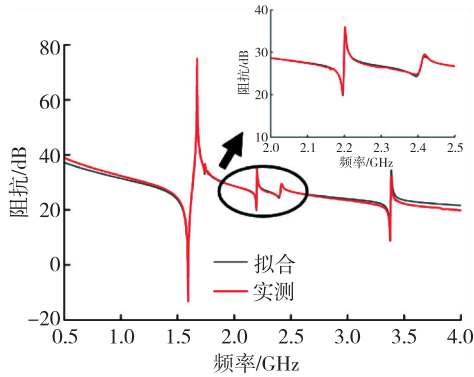
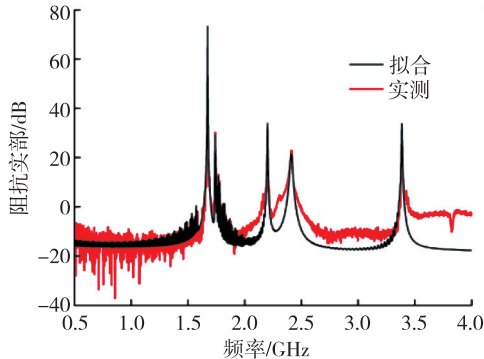


图 6 封装后 COM-MBVD 模型

利用此模型与谐振器工艺数据进行拟合,实测谐振器晶圆为 4 层 POI 结构,从上至下分别为  $42^\circ\text{Y-X}$  LiTaO<sub>3</sub>、SiO<sub>2</sub>、Poly-Si、Si,其厚度分别为  $0.6\ \mu\text{m}$ 、 $0.5\ \mu\text{m}$ 、 $1\ \mu\text{m}$ 、 $400\ \mu\text{m}$ 。谐振器叉指电极材料为 Al,厚为  $0.18\ \mu\text{m}$ ,叉指半周期  $p=1.2\ \mu\text{m}$ ,孔径  $W=65p$ ,叉指对数  $N=100$ ,反射栅条数为 30。利用 COM-MBVD 混合模型拟合实测谐振器图像如图 7 所示。



(a) COM-MBVD拟合实测谐振器阻抗图像



(b) COM-MBVD拟合实测谐振器阻抗实部图像

图 7 COM-MBVD 模型拟合谐振器

由于本模型是将 COM 模型和 MBVD 模型进行电学并联,而实际谐振器中高频杂散响应间存在声学耦合情况。因此,本模型在拟合高阶谐振响应时存在一定误差,但这种误差在滤波器设计中可以接受。

## 2 实验

根据上述理论构建 COM-MBVD 多模态混合模型,利用多模态混合模型拟合串联谐振器和并联谐振器。搭建 8 阶梯形结构滤波器,通过仿真优化,将 I. H. P SAW 滤波器制作于  $42^\circ\text{Y-X}$  LiTaO<sub>3</sub>、SiO<sub>2</sub>、Poly-Si、Si 多层晶圆上,对应厚度分别为  $0.6\ \mu\text{m}$ 、 $0.5\ \mu\text{m}$ 、 $1\ \mu\text{m}$ 、 $400\ \mu\text{m}$ ,金属铝电极厚为  $0.18\ \mu\text{m}$ 。图 8 为 8 阶梯形电路拓扑图。

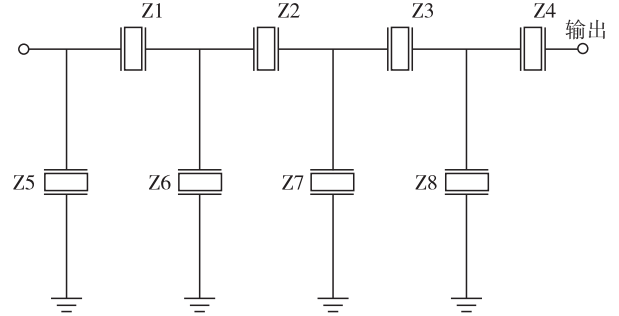
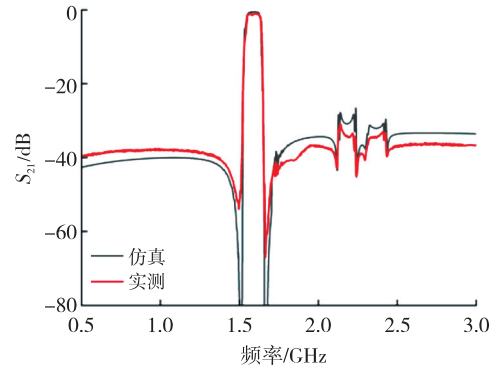


图 8 8 阶梯形电路拓扑图

将 COM-MBVD 混合模型仿真优化的结果与流片滤波器测试数据进行对比,滤波器仿真结果右侧的杂散模态与实际流片结果吻合度较高。实测得设计中心频率为  $1\ 590\ \text{MHz}$ ,通带插入损耗  $S_{21}$  小于  $1.6\ \text{dB}$ ,带内波动为  $1\ \text{dB}$ ,带宽为  $80\ \text{MHz}$  (相对带宽为  $5\%$ ) 的 SAW 滤波器。图 9 为基于多模 COM-MBVD 混合模型  $S_{21}$  仿真结果与滤波器实测结果对比。



(a) 仿真结果与实测  $S_{21}$  响应曲线对比

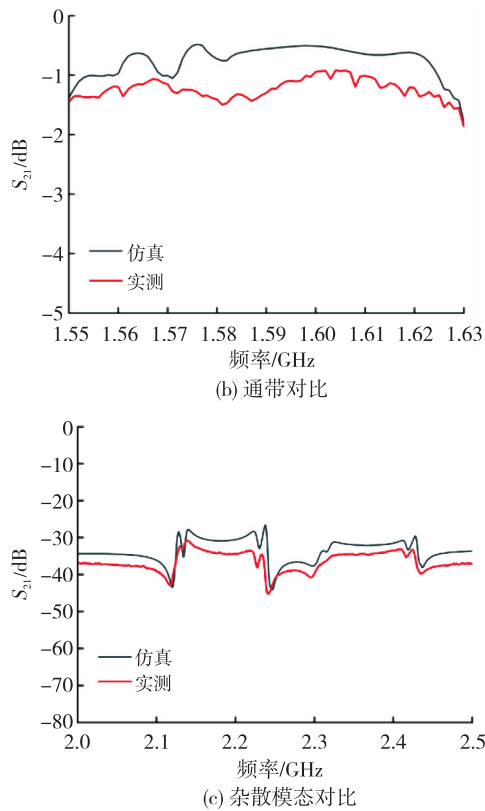


图9 仿真结果与滤波器实测对比

利用 COM-MBVD 模型拟合实测谐振器时在高阶谐振响应存在一定的误差,同时使用 COM-MBVD 模型设计滤波器时并未考虑到实际版图中金属汇流条的电磁寄生影响,造成了滤波器的仿真设计和实测数据在带外抑制及高阶响应处存在的差距。由图 9(c)可看到,实测的带外抑制比设计结果大,这有利于设计时为设计指标留有余量。

### 3 结束语

传统单模 COM 模型仅能考虑主模态和主模态附近弱耦合情况,不能模拟到远端高阶水平剪切

波、西沙瓦波等杂散模态。本文从理论出发利用  $R_m C_m L_m$  谐振支路拟合杂散模态,并提出了拟合不同阶数的多模 COM-MBVD 混合模型,描述了构建多模拟合模型的具体过程。实验表明,多模 COM-MBVD 模型拟合谐振器实测数据拟合度较高,且根据此模型设计的滤波器仿真结果与滤波器测试数据吻合较好。

### 参考文献:

- [1] XIAO Q, JI X, MA X, et al. A new general form of 2-D coupling-of-modes equations for analysis of waveguiding in surface acoustic wave devices[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2020, 67(5):1033-1039.
- [2] 潘峰. 声表面波材料与器件[M]. 北京:科学出版社,2012.
- [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] LOSEU A, PLESSKY V. The COM model including the bulk wave scattering at the end of IDTs in synchronous resonators[C]//Venice, Italy: 2022 IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS), 2022:1-4.
- [5] WU X, ZHONG H, DU B, et al. A Nonlinear multi-mode COM model for TCSAW analysis[C]//Chengdu, China: 2023 IEEE MTT-S International Microwave Workshop Series on Advanced Materials and Processes for RF and THz Applications (IMWS-AMP), 2023:1-3.
- [6] CHEN S, YIN Q, HU C, et al. Design and optimization of FBAR filter using acoustic-electromagnetic coupling model and MBVD model[C]//Hangzhou, China: 2020 IEEE MTT-S International Conference on Numerical Electromagnetic and Multiphysics Modeling and Optimization (NEMO), 2020:1-3.