

体声波滤波器功率容量的评估方法

高 杨, 韩 超, 袁 靖

(西南科技大学 信息工程学院, 四川 绵阳 621010)

摘 要:为了解决在体声波(BAW)滤波器的设计中对功率容量指标考虑欠缺的问题,提出了一种 BAW 滤波器功率容量的评估方法。首先通过 BAW 滤波器在特定输入功率和环境温度下的声-电磁-热多物理场仿真,得到在自热效应下各单元谐振器的叠层温度平均值;然后将叠层温度平均值作为设计参量引入到 Mason 模型中,搭建含温度参量的 Mason(T)(T 为温度)模型;最后在 Mason(T)模型中模拟 BAW 滤波器的传输曲线,根据在全温度范围内各项性能指标是否超标来评估 BAW 滤波器的功率容量水平。仿真结果表明,在输入功率为 23 dBm、环境温度为全温度范围($-25\sim 85\text{ }^{\circ}\text{C}$)时,BAW 滤波器的各项指标均未超标;在输入功率为 30 dBm、环境温度为 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,BAW 滤波器的上频带插入损耗和带外抑制已超标,性能出现明显退化。

关键词:体声波滤波器;多物理场;自热效应;功率容量;评估方法

中图分类号:TN713;TN603.5;TN702 **文献标识码:**A **DOI:**10.11977/j.issn.1004-2474.2019.06.001

Evaluation Method of Power Handling of Bulk Acoustic Wave Filter

GAO Yang, HAN Chao, YUAN Jing

(School of Information Engineering, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, China)

Abstract: In order to solve the problem of insufficient consideration of power handling in the design of bulk acoustic wave(BAW) filters, a method for evaluating the power handling of BAW filters is proposed. First, the average temperature value of each stack of the unit resonator under the self-heating effect is obtained by the acoustic-electromagnetic-thermal multi-physics field simulation of the BAW filter at a specific input power and ambient temperature. Then, the average temperature values are introduced as design parameters into the Mason model to establish the Mason(T) model with temperature parameters. Finally, the transmission curve of the BAW filter is simulated in the Mason(T) model, and the power handling of BAW filter is evaluated according to whether all the specifications exceed the standard in the whole temperature range. The simulation results of the case filter show that all the parameters of the BAW filter do not exceed the standard when the input power is 23 dBm and the ambient temperature is in the whole temperature range($-25\sim 85\text{ }^{\circ}\text{C}$). However, when the input power is 30 dBm and the ambient temperature is $30\text{ }^{\circ}\text{C}$, the upper band insertion loss and out-of-band rejection of the BAW filter have exceeded the standard, and the performance is significantly degraded.

Key words: BAW filter; multi-physics field; self-heating effect; power handling; evaluation method

0 引言

随着通信技术的发展,体声波(BAW)滤波器持续向小型化发展的同时,也已呈现出高功率的发展趋势。一方面,5G 通信技术将促使微基站广泛应用,提高微基站中 BAW 滤波器的功率容量已成为必须考虑的问题^[1-3]。另一方面,在手机射频前端模块中,双工器中的发射滤波器(Tx)需处理来自功率放大器的输出信号,这要求 Tx 滤波器必须处理更高的功率水平(如 30 dBm ^[4],即 1 W),以提供更高的可靠性^[5-6]。在高功率作用下,BAW 滤波器中的

功率密度将增加。高功率密度会通过自热效应的形式导致器件温度升高,从而引发性能指标超标、寿命缩短、故障率上升等问题^[6-7]。其中,性能指标超标是高功率 BAW 滤波器最根本的一种失效模式。如果只能通过实际器件的首次测量来确认这种设计缺陷,则会浪费大量的资源 and 时间。换言之,如果能够对早期阶段的仿真设计进行功率容量的评估,从而为高功率 BAW 滤波器的设计提供参考依据,这将会大幅缩短设计周期、减少样品的迭代测试,从而提高产品的上市速度^[7]。评估 BAW 滤波器功率容量

收稿日期:2019-05-22

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61574131)

作者简介:高杨(1972-),男,山西临县人,研究员,博士,主要从事微电子机械系统的研究。E-mail:29636791@qq.com。

的基础是热仿真。文献[8-11]报道的BAW器件热仿真法存在仿真耗时高^[8],耗散功率计算不准^[9-10],仿真维度太低导致无法观测热/冷点信息^[11]等问题。此外,功率容量评估的具体方法也还有待完善,需将热仿真结果同BAW滤波器的性能观测联系起来,以构建一个闭环的评估流程。

针对上述问题,本文采用声-电磁-热(A-EM-T)多物理场仿真路线,提出一种闭环的BAW滤波器功率容量评估方法,可以在全温度范围内快速、有效地评估所设计的BAW滤波器的功率容量。该方法也是高功率BAW滤波器的故障物理认识、设计优化的基础。

1 原理

BAW滤波器的构建单元是BAW谐振器(BAWR),它是一种微机电系统(MEMS)工艺加工的微型电声谐振器。当对BAW滤波器输入一定功率时,BAW滤波器中各BAWR会发生自热效应,由于BAWR的温度特性,最终会导致BAW滤波器的电磁(EM)性能发生变化。当输入功率(P_{in})较大时,BAWR声学性能的自热效应将会变得更显著。所以在BAW器件中存在着复杂的声-

电磁-热多物理场耦合关系。即高功率的电磁输入功率在器件中产生自热,自热作用于声学(压电)材料,压电材料声学特性的热致变化引起器件电磁功能特性的变化。其中,自热主要源于BAWR中的电流通过较薄的金属导体时产生的焦耳热^[12-13];器件电磁功能特性的变化主要是由于BAWR中薄膜叠层材料属性(主要是压电层的弹性常数)具有温度相关性,从而导致BAWR中纵波声速的改变,并最终影响BAWR的谐振频率及滤波器的滤波性能^[14]。

此外,BAW滤波器的滤波性能还会受到环境温度(T_a)的影响^[15-16]。为满足电子产品的多场景应用需求,BAW滤波器必须在特定 P_{in} 下保证全温度范围内正常工作。总之,BAW滤波器的滤波性能是受 P_{in} 和 T_a 的共同影响。所以,功率容量的评估可采取以下判据:在 P_{in} 作用下,BAW滤波器的各项性能指标在全温度范围内均不超标,即被认为该BAW滤波器的功率容量可以达到 P_{in} 。

2 方法

对BAW滤波器进行功率容量评估的方法如图1所示。

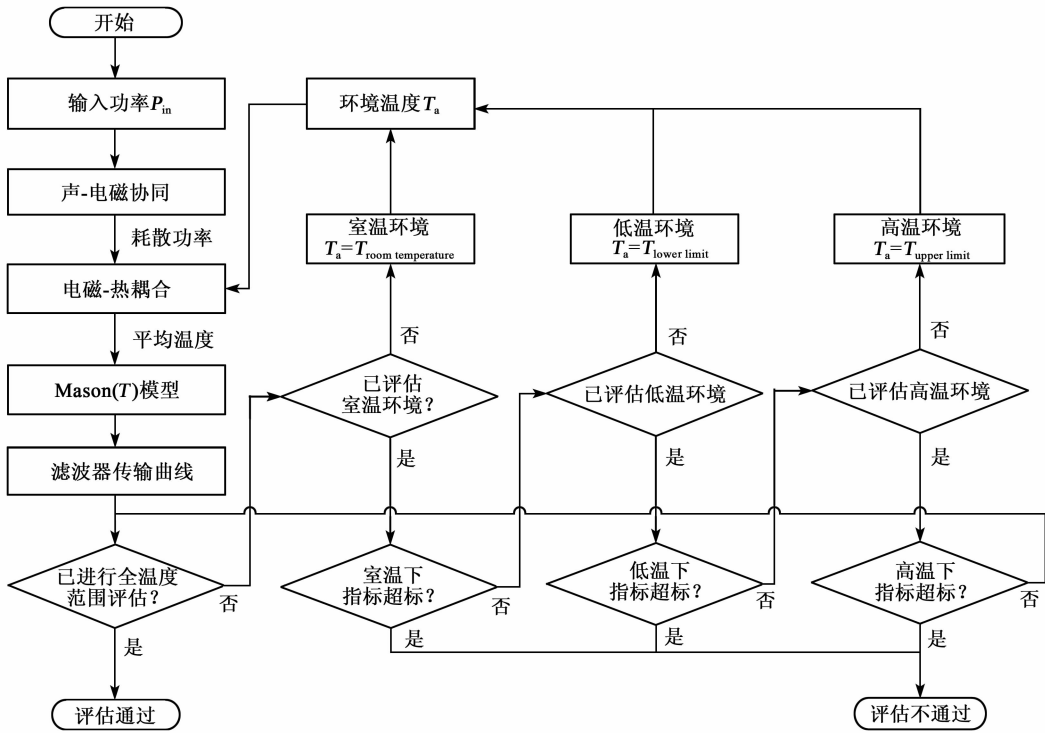


图1 BAW滤波器功率容量评估方法

BAW滤波器功率容量评估的第一步是由声-电磁(A-EM)协同仿真^[17]得到滤波器的耗散功率。其中, P_{in} 的大小可在电磁仿真软件HFSS中进行设置

(如设置为常规值23 dBm,即约为0.2 W)。然后采取从热耦合到电磁的路线,通过数据链接,在热仿真软件ePhysics和电磁仿真软件HFSS中共享相同

的 BAW 滤波器的几何结构,为电磁-热耦合仿真做准备。接着,在 ePhysics 中分配材料和边界条件,并设置耦合求解方式。其中, T_a 是由热仿真软件 ePhysics 设置的。至此,声-电磁-热多物理仿真设置完毕,仿真求解出 BAW 滤波器的 3D 温度分布、BAWR 中各叠层的平均温度数值。最后,将所得到的各单元谐振器的叠层平均温度通过相应的材料温度系数^[18]引入到 Mason 模型中,构建含温度参量的 Mason 模型(本文命名为“Mason(T)模型”),采用该模型模拟出 BAW 滤波器在给定输入功率和环境温度下的传输曲线。通过观测滤波器的指标是否超标来评估该设计的功率容量。只有当滤波器在常温环境(如 30 ℃)、低温环境(如-25 ℃)及高温环境(如+85 ℃)下各项性能指标均未超标时,才能通过仿真评估。即该滤波器设计可在全温度范围内保持正常工作,功率容量水平不小于 P_{in} 。

3 功率容量评估

以一款 S 波段窄带带通 BAW 滤波器设计^[19]为例,沿用第 2 节功率容量评估方法的流程和细节。

本次评估中,低温环境温度取-25 ℃、室温取 30 ℃、高温环境温度取+85 ℃。该 BAW 滤波器中各 BAWR 的连接关系、滤波器版图布局和指标如图 2 和表 1 所示。由图 2 可知,该 BAW 滤波器有 3 只串联谐振器 S_1 、 S_2 、 S_3 (S_n 为第 n 只串联谐振器)和 4 只并联谐振器 P_1 、 P_2 、 P_3 、 P_4 (P_n 为第 n 只并联谐振器)。BAWR 的薄膜叠层为 Mo-AlN-Mo-Si₃N₄-SiO₂5 层复合结构。

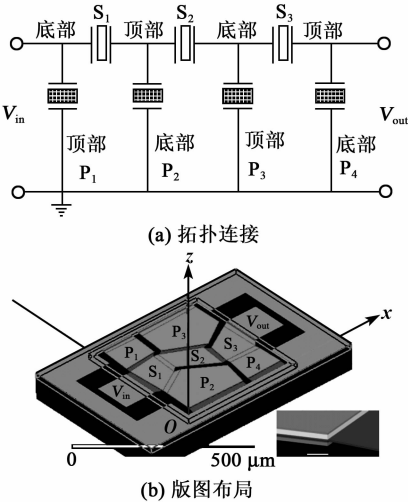


图 2 案例 S 波段 BAW 滤波器的拓扑结构和布局

表 1 案例 S 波段 BAW 滤波器的性能指标

滤波器指标	初始指标
中心频率/GHz	2.460
带 宽/MHz	41
频率点/GHz	2.440, 2.481
带内插损/dB	>-3
带外抑制	<-40 dB@2.385~2.396 GHz; <-40 dB@2.495~2.506 GHz

对该案例实施声-电磁-热多物理场仿真,得到 P_{in} 为 23 dBm、 T_a 为 30 ℃ 下的 3D 温度分布(见图 3)及各 BAWR 中各叠层的平均温度(见表 2)。然后,利用各 BAWR 的叠层平均温度构建 Mason(T)模型。

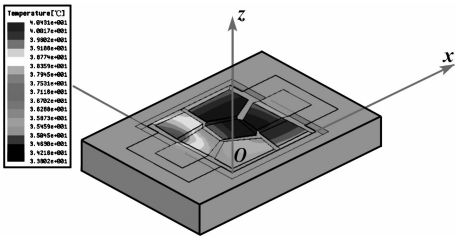


图 3 S 波段 BAW 滤波器的温度分布
表 2 各单元谐振器的平均温度

	温度/℃						
	S_1	S_2	S_3	P_1	P_2	P_3	P_4
顶电极	38.117	34.261	34.339	39.059	35.952	34.242	34.646
AlN	38.117	34.261	34.339	39.059	35.952	34.242	34.646
底电极	38.117	34.26	34.339	39.059	35.952	34.242	34.646
Si ₃ N ₄	38.117	34.26	34.339	39.059	35.952	34.242	34.646
SiO ₂	38.117	34.262	34.34	39.058	35.953	34.243	34.648

1) 自热温度会改变各叠层材料的弹性常数^[14]为

$$c_{33}(T) = c_{33}(T_a) \cdot [1 + TC_{c_{33}}(T - T_a)] \quad (1)$$

式中: T 为自热温度; $c_{33}(T)$ 、 $c_{33}(T_a)$ 分别为自热温度和环境温度下的弹性常数; $TC_{c_{33}}$ 为弹性常数的温度系数。

2) 弹性常数会改变声速,则有^[20]

$$v_{a_piezo}(T) = \sqrt{\frac{c_{33}(T) + e_{33}^2/\epsilon_{33}}{\rho}} \quad (2)$$

$$v_{a1}(T) = \sqrt{\frac{c_{33}(T)}{\rho}} \quad (3)$$

式中: $v_{a_piezo}(T)$ 、 $v_{a1}(T)$ 分别为压电层和普通声学层的纵波声速; e_{33} 为压电应力常数; ϵ_{33} 为夹持介电常数; ρ 为密度。

3) 声速将直接影响 BAWR 的谐振频率并最终

影响 BAW 滤波器的滤波特性^[20],即

$$f_p = \frac{v_a}{2d} \quad (4)$$

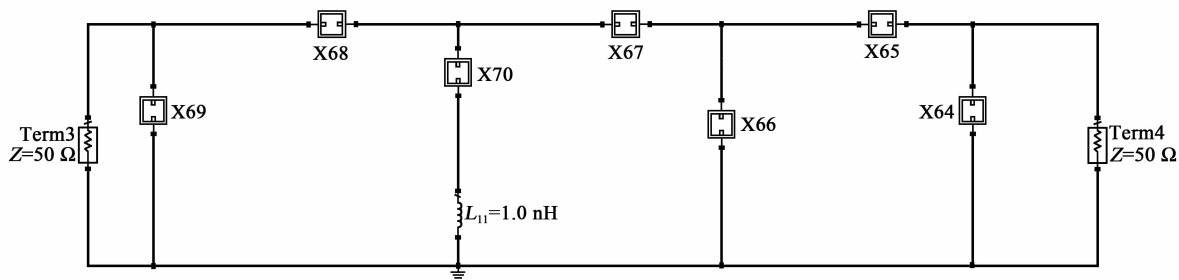
式中: f_p 为谐振器的并联谐振频率; v_a 为纵波声速; d 为叠层厚度。

根据式(1)~(3),在 ADS 软件中,把 T_a 和 BAWR 的叠层平均温度及其温度系数^[18]引入到 Mason 模型中,并进行参数设置和叠层温度封装,得到包含温度参量的 Mason(T)模型。在该模型中, T_a 和各单元谐振器的自热温度可根据热仿真的

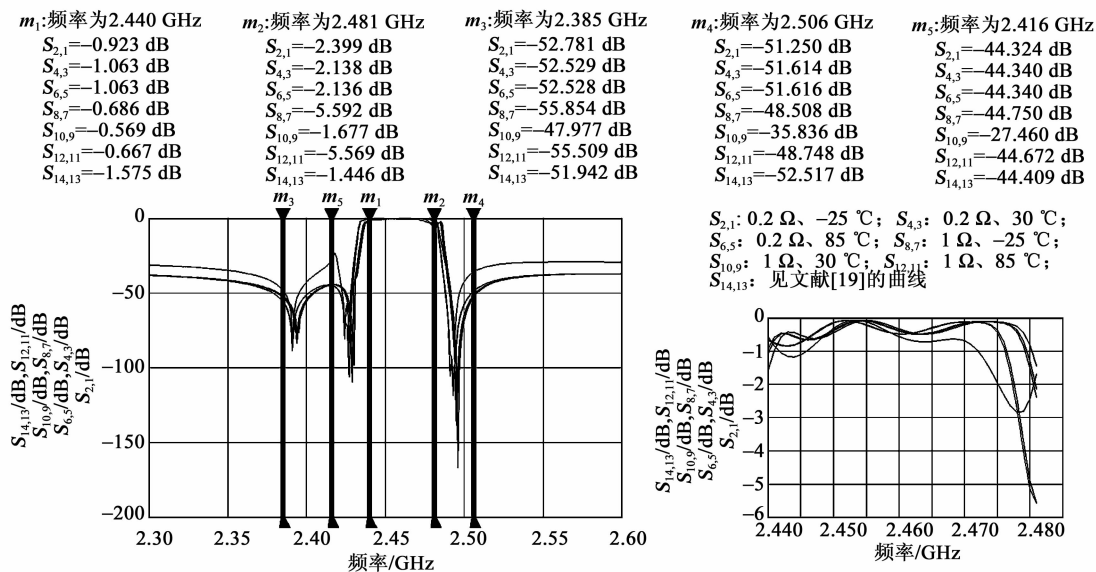
边界条件和仿真结果来进行设定。

需要说明的是,由于同一个 BAWR 内部各叠层的温度值非常接近,为简便起见,可在 Mason(T)模型中忽略同一 BAWR 内各叠层的微小温差。

根据 Mason(T)模型,可以模拟出该 S 波段窄带带通 BAW 滤波器在不同输入功率(0.2 W 和 1 W)、不同环境温度($-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $+85\text{ }^{\circ}\text{C}$)下的滤波特性。图 4 为 0.2 W、 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 情况下的原理图。其他的输入功率与环境温度组合条件下的原理图,只需更改相应的输入参数。



(a) 电路原理图



(b) 不同输入功率和环境温度下的传输曲线

图 4 电路原理图及其仿真结果

由于该 BAW 滤波器通带的上、下频点分别为 2.440 GHz 和 2.481 GHz,且 2.385 GHz 和 2.506 GHz 为该 BAW 滤波器带外抑制指标的重要临界点,所以选择这 4 个频点为性能观测点。此外,在 2.416 GHz 处,带外抑制指标存在明显变化,故将其选为性能观测点。这 5 个频点处的性能如图 4 所示。由图 4 可知,该 BAW 滤波器在输入功率为 23 dBm 下,全温度范围($-25\sim+85\text{ }^{\circ}\text{C}$)内的性能虽略有变动,但各项指标均未超标,因此判定该

BAW 滤波器设计的功率容量可达到 23 dBm。同时,该 BAW 滤波器在承受更高的输入功率(30 dBm)时,其性能明显退化。具体表现为:在 $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $+85\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,上频带插入损耗超标(分别为 $-5.592\text{ dB}@2.481\text{ GHz}$ 和 $-5.569\text{ dB}@2.481\text{ GHz}$);在常温环境 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,带外抑制($-35.836\text{ dB}@2.506\text{ GHz}$ 、 $-27.460\text{ dB}@2.416\text{ GHz}$)不满足指标($<-40\text{ dB}$)。所以,该 BAW 滤波器无法达到 30 dBm 的较高功率容量。

4 结束语

基于声-电磁(A-EM)协同仿真,提出了一种闭环的BAW滤波器功率容量评估方法,可在全温度范围内快速、有效地评估BAW滤波器设计的功率容量水平。以一个S波段窄带带通BAW滤波器为例,展示了该评估方法的使用流程和细节。

对于该滤波器设计,功率容量可达到23 dBm;但在30 dBm时,插入损耗、带外抑制等指标超标,无法达到30 dBm的较高功率容量。

参考文献:

- [1] GALIPEAU J, CHANG R E. Design considerations for high power BAW duplexers for base station applications[C]//S. l. : Proceedings of the IEEE Ultrasonics Symposium, 2015: 1-4.
- [2] 张慧金,董树荣,赵士恒,等. FBAR滤波器及其组件: CN102111124A [P]. 2011.
- [3] HEEREN W, FATTINGER M, FATTINGER G, et al. Impact of thermo-mechanical stress on the TCF of WLP BAW filters [C]//S. l. : Proceedings of the IEEE Ultrasonics Symposium, 2016: 1-4.
- [4] BRADLEY, PAUL, LARSON J D, et al. A film bulk acoustic resonator(FBAR) duplexer for USPCS handset applications [C]//S. l. : Proceedings of the IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest, 2001: 367-370.
- [5] HASSINE N B, MERCIER D, RENAUX P. Solidly mounted resonators under high power study for reliability assessment[C]//S. l. : Proceedings of the IEEE Research in Microelectronics and Electronics, 2009: 248-251.
- [6] VAN DER WEL P J, WUNNICKE O, DE BRUIJN F, et al. Thermal behaviour and reliability of solidly mounted bulk acoustic wave duplexers under high power RF loads[C]//S. l. : Proceedings of the IEEE Reliability Physics Symposium, 2009: 557-561.
- [7] FATTINGER M, STOKES P, FATTINGER G. Thermal modeling of WLP-BAW filters: Power handling and miniaturization[C]//S. l. : Proceedings of the IEEE Ultrasonics Symposium(IUS), 2015: 1-4.
- [8] HAGELAUER A, FATTINGER G, RUPPEL C C W, et al. Microwave acoustic wave devices: Recent advances on architectures, modeling, materials, and packaging[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2018(99): 1-15.
- [9] WUNNICKE O, VAN DER WEL P J, STRIJOS R C, et al. Thermal behavior of BAW filters at high RF power levels[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2009, 56(12): 2686-2692.
- [10] ELLA J, YLILAMMI M. Modelling of ZnO-based BAWs at high signal levels[C]//S. l. : Proceedings of the IEEE Ultrasonics Symposium, 2002: 985-988.
- [11] HASSINE N B, MERCIER D, RENAUX P, et al. Self-heating under RF power in BAW SMR and its predictive 1D thermal model[C]//S. l. : Proceedings of the IEEE Frequency Control Symposium, 2009: 237-240.
- [12] TAG A, WEIGEL R, HAGELAUER A, et al. Influence of dissipated power distribution on BAW Resonators' behavior[C]//S. l. : Proceedings of the IEEE Ultrasonics Symposium, 2014: 2627-2630.
- [13] YANG T, CAO Z, FELD D A. An H2 emissions model for piezoelectric devices exhibiting strong lateral mode resonances [C]//S. l. : Proceedings of the IEEE Ultrasonics Symposium, 2017: 1-7.
- [14] TAG A, WEIGEL R, HAGELAUER A, et al. Influence of temperature distribution on behavior, modeling, and reliability of BAW resonators[C]//S. l. : Proceedings of the IEEE Reliability Physics Symposium, 2014: 5C. 5. 1-5C. 5. 7.
- [15] TAG A, CHAUHAN V, WEIGEL R, et al. Multiphysics modeling of BAW filters[C]//S. l. : Proceedings of the IEEE Ultrasonics Symposium(IUS), 2015: 1-4.
- [16] TAG A, CHAUHAN V, HUCK C, et al. A method for accurate modeling of BAW filters at high power levels [J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2016, 63(12): 2207-2214.
- [17] SELIMOVIC N, BADER B, KIWITT J, et al. Comparison of different electromagnetic models of bulk acoustic wave resonators and filters[C]//S. l. : Proceedings of the IEEE Ultrasonics Symposium, 2011: 1708-1711.
- [18] PETIT D, ABELE N, VOLATIER A, et al. Temperature compensated Bulk acoustic wave resonator and its predictive 1D acoustic tool for RF filtering[C]//S. l. : Proceedings of the IEEE Ultrasonics Symposium, 2007: 1243-1246.
- [19] 高杨,赵坤丽,韩超. S波段窄带带通体声波滤波器设计[J]. 强激光与粒子束, 2017, 29(11): 29114101(7).
- [20] 金浩. 薄膜体声波谐振器(FBAR)技术的若干问题研究[D]. 杭州:浙江大学, 2006.