

文章编号 1004-924X(2018)09-2229-07

高功率体声波谐振器的自热效应及其修正

韩 超¹, 高 杨^{2*}, 张大鹏^{1,3}

(1. 西南科技大学 信息工程学院, 四川 绵阳 621010;

2. 中国工程物理研究院 电子工程研究所, 四川 绵阳 621999;

3. 中国科学院 高能物理研究所 核探测与核电子学国家重点实验室, 北京 100049)

摘要:为了在高功率体声波谐振器的设计中考虑自热效应的影响,提出一种声-电磁-热多物理场协同仿真方法,来模拟自热导致的频率偏移,并针对此频率偏移的消除问题,提出了相应的修正方案。首先,由常用的 Mason 模型设计出满足谐振频率要求的初始谐振器。接着,通过声-电磁-热多物理场协同仿真得到自热导致的频率偏移。然后,初步调整压电层厚度,来抵消此频率偏移。最后,对调整后的谐振器迭代进行声-电磁-热多物理场协同仿真,以确定压电层厚度的调整量。结果表明:自热效应会导致高功率体声波谐振器的谐振频率明显下偏(谐振器案例的频率偏移量为 3 MHz),通过减薄压电层厚度(案例中为 1.7 nm)可彻底消除此频率偏移。所提出的高功率体声波谐振器的修正方案能有效地解决自热效应导致的谐振频率偏移问题。

关键词:高功率体声波谐振器;自热效应;频率偏移;多物理场协同仿真;设计修正

中图分类号:TN65;TN702 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20182609.2229

Self-heating effect and its modification of high power bulk acoustic-wave resonators

HAN Chao¹, GAO Yang^{2*}, ZHANG Da-peng^{1,3}

(1. School of Information Engineering, Southwest University of
Science and Technology, Mianyang 621010, China;

2. Institute of Electronic Engineering,

Chinese Academy of Engineering Physics, Mianyang 621999, China;

3. State Key Laboratory of Particle Detection and Electronics,
Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

* Corresponding author, E-mail: gaoyang@caep.cn

Abstract: In order to study self-heating effects in the design of high-power bulk acoustic-wave resonators, an acoustic electromagnetic thermal multiphysics co-simulation method was proposed to simulate frequency shifts caused by self-heating. A corresponding design modification scheme was proposed to eliminate these frequency shifts. First, an initial resonator that satisfies the resonant frequency requirement was designed from the commonly used Mason model. Then, the frequency

收稿日期:2018-05-18;**修订日期:**2018-07-02.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 61574131);中国工程物理研究院超精密加工技术重点实验室基金资助项目(No. 2014ZA001);核探测与核电子学国家重点实验室开放课题基金资助项目(No. 2016KF-02)

shifts caused by self-heating were obtained through acoustic electromagnetic thermal multiphysics co-simulation. Next, the frequency shifts were eliminated by adjusting the preliminary thickness of the piezo-layer. Finally, the acoustic electromagnetic thermal multiphysics co-simulation was performed iteratively on the adjusted resonator to determine the final thickness adjustment of the piezo-layer. The results show that the self-heating effect causes the resonant frequency of the high-power bulk acoustic-wave resonator to shift downward significantly (the frequency shift of the resonator case was 3 MHz), and this frequency shift can be completely eliminated by reducing the thickness of the piezo-layer (1.7 nm for the resonator case). The proposed scheme for design modification of high-power bulk acoustic-wave resonators can effectively solve the problem of frequency shifts resulting from self-heating.

Key words: high power bulk acoustic-wave resonator; self-heating effect; frequency shifts; multiphysics co-simulation; design modification

1 引 言

体声波(Bulk Acoustic Wave, BAW)滤波器具有高带外抑制、低插入损耗、滚降陡峭、工作频率高等优点,能在相同尺寸和成本下提供更好的滤波性能^[1]。随着通信技术的发展,高功率 BAW 滤波器的市场需求越来越大。首先,在手机射频前端模块中,双工器中的 TX 滤波器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,以提供更高的可靠性^[2]。如 Qorvo 公司的 BAW TX 滤波器 TQQ0041T,其峰值输入功率可达 37 dBm (5 W)。其次,5 G 通信技术推动了微基站的普及,所以提高微基站中 BAW 滤波器的功率水平也已成为必须考虑的问题^[3-5]。Qorvo 公司于 2014 年和 2016 年分别推出基站用的 BAW 滤波器 885053 和 TQQ7301,其功率水平能够达到 33 dBm(2 W)。另外,高功率 BAW 滤波器在移动路由器、便携式热点、高功率 WLAN 接入点中也具有很大的应用需求。

相比于常规 BAW 滤波器(功率水平在 23 dBm 左右,即 0.2 W),高功率 BAW 滤波器所面临的一个主要问题是自热效应。在高功率作用下,自热效应迅速导致滤波器的性能指标超标^[5-6],其中最显著的指标是滤波器通带的热漂移。BAW 滤波器的构建单元是体声波谐振器(Bulk Acoustic Wave Resonator, BAWR)^[7],BAWR 的自热效应已有多例研究报道。Brice

Ivira 等^[8]提出了纯热模拟法来研究 BAWR 的自热效应,在压电层中施加一个功率密度源来定义谐振器中所发生的焦耳热。该方法是将施加的输入功率作为谐振器的耗散功率,没有考虑到谐振器反射的部分功率,仿真得到的温度值偏大。N. B. Hassine 等^[9]提出一种 1D 热预测模型。利用该模型,BAWR 的温度变化可由热阻和耗散功率得到,但无法得到温度的 3D 分布。A. Tag 等^[10]提出一种考虑非均匀温度分布的建模方法,可以得到 BAWR 的空间温度分布。但耗散功率(即热仿真的热源)是由反射系数和输入功率计算得到的,因此只能得到总耗散功率的大小,而不能得到耗散功率在谐振器内部的分布^[11]。此外,上述文献均未对自热效应造成的影响提出有效的修正措施。

针对上述问题,本文建立了一种声-电磁-热多物理场协同仿真方法,以预测自热所致的高功率 BAWR 的频率偏移,并提出了通过调整 BAWR 中压电层厚度进行设计修正的方案和具体措施。

2 原 理

当 BAWR 承受一定功率时,BAWR 会发生自热效应,导致器件温度上升。由于常规 BAWR 的输入功率较小,所以自热所致的温度改变不足以对其谐振特性造成明显的影响。但是,高功率 BAWR 的自热效应会使器件温度大幅上升。此时,BAWR 的谐振特性将明显改变,从而会影响

BAW 滤波器的传输曲线^[10]。图 1 为 BAW 滤波器在不同输入功率 P_{in} 下的传输曲线。可以看出,当输入功率为 34.5 dBm(2.8 W)时,传输曲线会明显下偏;当输入功率进一步增大时,BAW 滤波器甚至会出现性能失效。

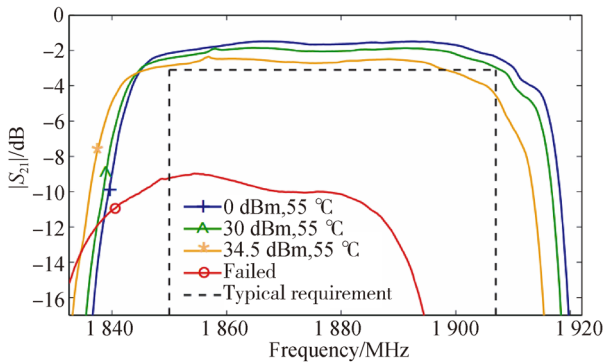


图 1 BAW 滤波器在不同输入功率下的传输曲线^[10]
Fig. 1 Transmission curves of BAW filter at different P_{in}

自热效应造成这种频率偏移的物理机制如下:BAWR 是一种电声谐振器,其内部存在多种损耗^[12],这些损耗是自热效应的热源。当 BAWR 承受高功率时,自热会导致器件温度大幅上升,而高温将改变叠层的材料属性,即 BAWR 叠层的材料参数(如弹性常数、压电系数、介电常数、密度、厚度等)是温度相关的。在这些温度相关的参数中,温度对弹性常数的影响为主要因素,而对其他参量的影响可忽略。所以,可以主要考虑温度对弹性常数的影响^[13-14],且弹性常数同温度之间具有如下关系^[10]:

$$c_{33}(T) = c_{33}(T_0) \cdot [1 + TC_{c_{33}}(T - T_0)], \quad (1)$$

式中: T 和 T_0 分别表示自热温度和室温; $c_{33}(T)$ 和 $c_{33}(T_0)$ 分别为自热温度下和室温下的弹性常数; $TC_{c_{33}}$ 为弹性常数的温度系数。而弹性常数与纵波声速满足^[15]:

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

$$V_{a_metal}(T) = \sqrt{\frac{c_{33}(T)}{\rho}}. \quad (3)$$

式中: $V_{a_piezo}(T)$ 和 $V_{a_metal}(T)$ 分别为压电层和金属电极层的纵波声速; e_{33} 为压电应力常数; ϵ_{33} 为夹持介电常数; ρ 为密度。由于纵波声速与 BAWR 的谐振频率具有如下关系^[15]:

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

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。所以,高功率 BAWR 的自热效应最终将改变其谐振频率。

因此,在高功率 BAWR 的设计中,需要考虑自热效应所导致的温升^[16]。可将温度作为参量引入到 BAWR 的物理模型(Mason)中,从而在设计中考虑自热效应对 BAWR 谐振频率的影响。

3 方法

由于 BAWR 中的损耗是自热效应的热源,即声-电磁会影响到热,且自热所致的温升又会作用于 BAWR,使其谐振频率发生偏移,即热会反向影响声-电磁。所以,BAWR 中涉及多个物理场,需要提出一种声-电磁-热多物理场协同仿真方法,来对高功率 BAWR 进行准确地模拟,仿真流程如图 2 所示。

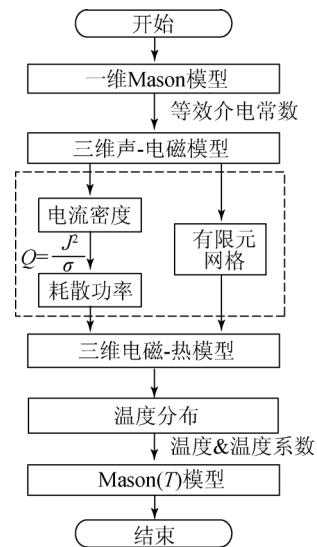


图 2 声-电磁-热多物理场协同仿真流程
Fig. 2 Flowchart of acoustic-electromagnetic-thermal multi-physics co-simulation

声-电磁-热多物理场协同仿真的第一步是声-电磁协同。通过将 BAWR 的压电效应包含于随频率复杂变化的等效复介电常数之内,并在三维电磁场仿真软件 HFSS 中用此等效复介电常数代替有源区中压电薄膜的夹持介电常数,可以实

现声场和电磁场协同^[17]。在进行声-电磁协同仿真之后,可得到 BAWR 电极的表面电流密度 J (见图 3),从而也可得到耗散功率密度 P_d (即热仿真的热源 Q)。电磁模型中耗散功率密度的计算基于:

$$Q = \frac{J^2}{\sigma}, \quad (5)$$

式中: Q 为导体欧姆损耗密度, J 为电流密度, σ 为电导率。

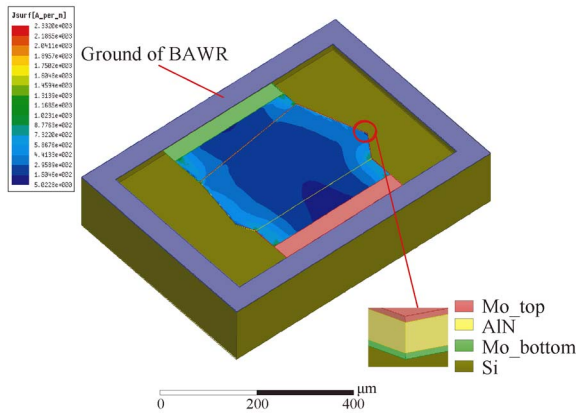


图 3 BAWR 的电流密度($P_{in} = 35$ dBm)

Fig. 3 Current density of BAWR with P_{in} of 35 dBm

声-电磁-热多物理场协同仿真的第二步是电磁-热耦合。在声-电磁模型中,利用 HFSS 中的剪切板控件,将 BAWR 的 3D 电磁模型导入到热仿真软件 e-Physics 中,并设置材料和边界条件。这样便可快速地由电磁模型构建出 BAWR 的热模型。通过软件自带的链接功能可实现电磁-热耦合。在热模型的分析求解中需设置“外部损耗导入”和“网格导入”。前者意味着将电磁仿真得到的耗散功率作为热源导入到热模型中,后者意味着将电磁模型中的有限元网格导入到热模型中。通过在 e-Physics 中链接 HFSS 仿真文件的路径,实现从电磁模型到热模型的映射,可将 BAWR 电磁模型中每个有限元网格内的耗散功率加载到 BAWR 热模型中的同一个有限元网格内,为热稳态分析提供输入条件。在实现电磁-热耦合仿真之后,得到 BAWR 的整体温度分布(见图 4)以及各叠层(压电层 AlN、顶电极层

Mo_top、底电极层 Mo_bottom)的平均温度和最高温度(见表 1)。

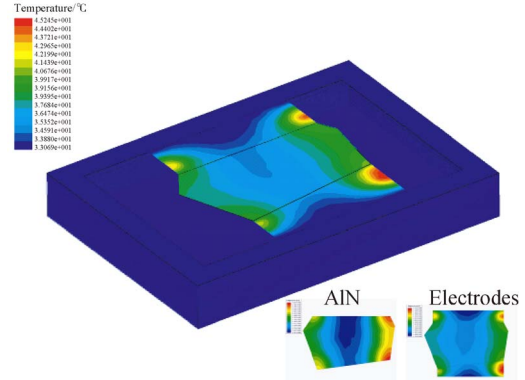


图 4 BAWR 的温度分布($P_{in} = 35$ dBm)

Fig. 4 Temperature distribution of BAWR with P_{in} of 35 dBm

表 1 仿真的叠层温度

Tab. 1 Simulated stack temperature (°C)

Stack	Average temperature	Maximum temperature
AlN	50.643	61.252
Mo_top	50.737	73.997
Mo_bottom	51.172	79.023

根据前文所述的原理,温度会改变弹性常数,弹性常数又会改变声速,声速将直接影响 BAWR 的谐振频率。所以,在由电磁-热耦合得到 BAWR 的温度场之后,接下来就需要将温度作为参量引入 Mason 模型中,来考虑自热效应所造成的频率偏移。由于 BAWR 有源区内的叠层材料以及叠层温度并不相同(见表 1),所以需要单独考虑各叠层的温度相关性。因此,根据式(1)~式(3),在 ADS 软件中,把 BAWR 各叠层的平均温度 T 和温度系数 TC ($TC_{AlN}: -0.6 \times 10^{-4}/^{\circ}C$; $TC_{Mo}: -1.3 \times 10^{-4}/^{\circ}C$ ^[18])引入到 Mason 模型中,并进行参数设置和初始室温设置(30 °C)。通过对各叠层温度进行封装,得到了包含温度参量的 Mason(T)模型,如图 5 所示。

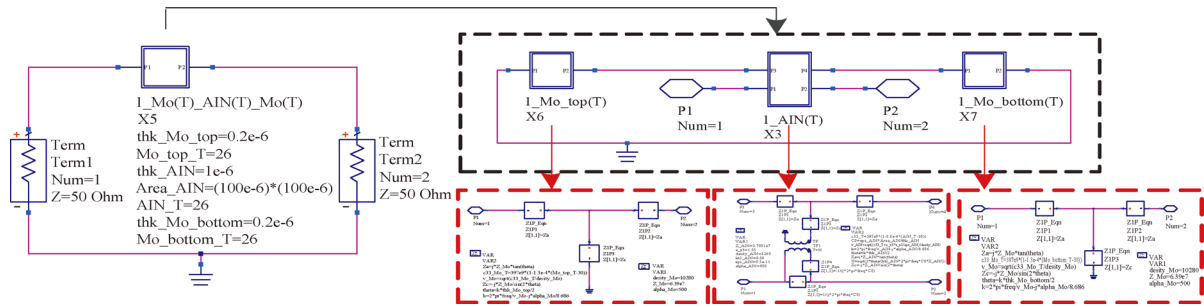


图 5 包含温度参量的 Mason (T)模型

Fig. 5 Mason (T) model with temperature parameters

4 结果与讨论

4.1 自热效应对高功率 BAWR 的影响

采用前述的声-电磁-热多物理场协同仿真方法,对结构参数如表 2 所示的 BAWR 分别馈入 0,23,35 dBm 的输入功率。通过 Mason (T)模型得出这三种输入功率下的谐振特性曲线,如图 6 所示。

表 2 BAWR 的结构参数
Tab. 2 Structural parameters of BAWR

Structural parameters	Mo _{top}	AIN	Mo _{bottom}	Silicon substrate
Thickness/ μm	0.2	1	0.2	100
Active area/ μm^2	69 000			

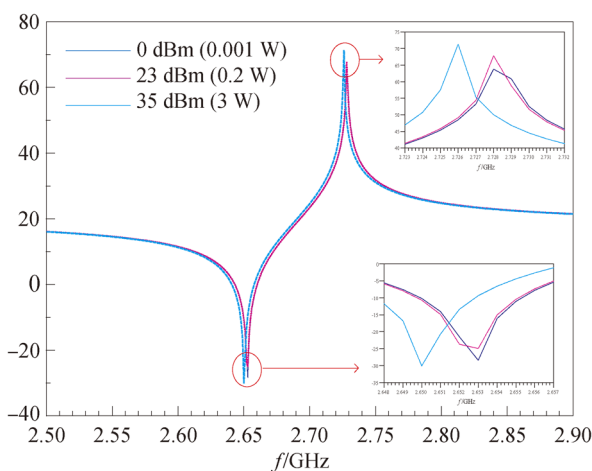


图 6 BAWR 在不同输入功率下的谐振曲线
Fig. 6 Resonant curves of BAWR at different P_{in}

由图 6 可以看出,当输入功率为 0 dBm 和 23 dBm 时,BAWR 的谐振特性曲线基本重合;当输入功率为 35 dBm 时,谐振特性曲线明显下偏,

且谐振频率由 2.653 GHz 下偏到 2.650 GHz。由此可见,常规 BAWR 的自热效应对其谐振频率的影响较小;高功率 BAWR 的自热效应会导致谐振频率明显下偏,在本案例中,BAWR 的频率偏移量达到 3 MHz。

4.2 高功率 BAWR 的设计修正

为了保证 BAW 滤波器良好的滤波特性,需要消除高功率 BAWR 因自热所致的频率偏移。由式(4)可知,BAWR 的谐振频率主要受到纵波声速和压电层厚度的影响。由于自热效应最终是通过降低纵波声速来改变谐振频率的,所以可通过减薄压电层厚度来抵消自热所致的频率偏移。结合压电层厚度调整以及前述的声-电磁-热多物理场协同仿真方法,提出了高功率 BAWR 的修正方案,如图 7 所示。

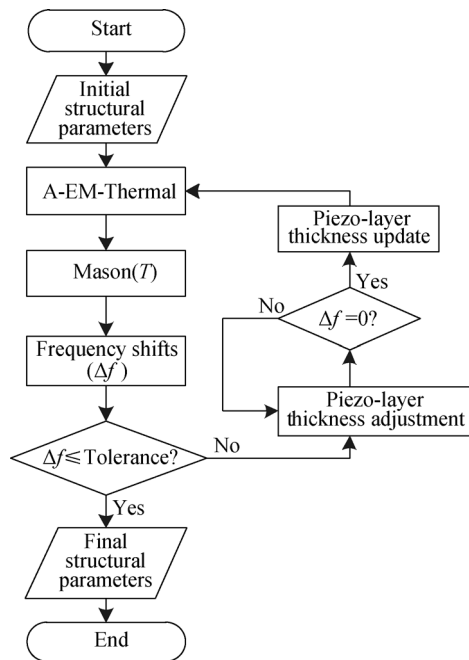


图 7 高功率 BAWR 的修正方案

Fig. 7 Modification scheme of high power BAWRs

该修正方案可简述如下:首先,根据初始 BAWR 的结构参数,进行声-电磁-热多物理场协同仿真,得到自热效应所致的频率偏移量 Δf 。然后,通过初步调整压电层厚度,消除此频率偏移。压电层厚度改变后,BAWR 的结构便发生了改变,同样地,其温度场也将发生改变。所以,最后还需对结构调整后的 BAWR 迭代进行声-电磁-热多物理场协同仿真,并再次判断频率偏移是否被消除。只有当压电层厚度调整后频率偏移量为 0,以及此结构下由声-电磁-热多物理场协同仿真得到的频率偏移量也满足容差要求时,迭代方可结束。此时,便可确定压电层的最终厚度调整量。

在本文的高功率 BAWR (35 dBm, 3W) 案例中,其自热效应所致的频率偏移为 3 MHz,经过 3 次压电层厚度调整后, Δf 被初步消除;当对 BAWR 结构进行了两次声-电磁-热多物理场协同仿真后, Δf 被彻底消除,如图 8 所示。此时,频率偏移(3 MHz)已通过减薄压电层厚度(1.7 nm)消除,并最终确定了 BAWR 的压电层厚度参数为 998.3 nm。在此结构参数下,高功率 BAWR 能稳定地工作在目标谐振频率 ($f_s = 2.652$ GHz, $f_p = 2.728$ GHz) 处,BAW 滤波器的通带热漂移问题可得以解决。

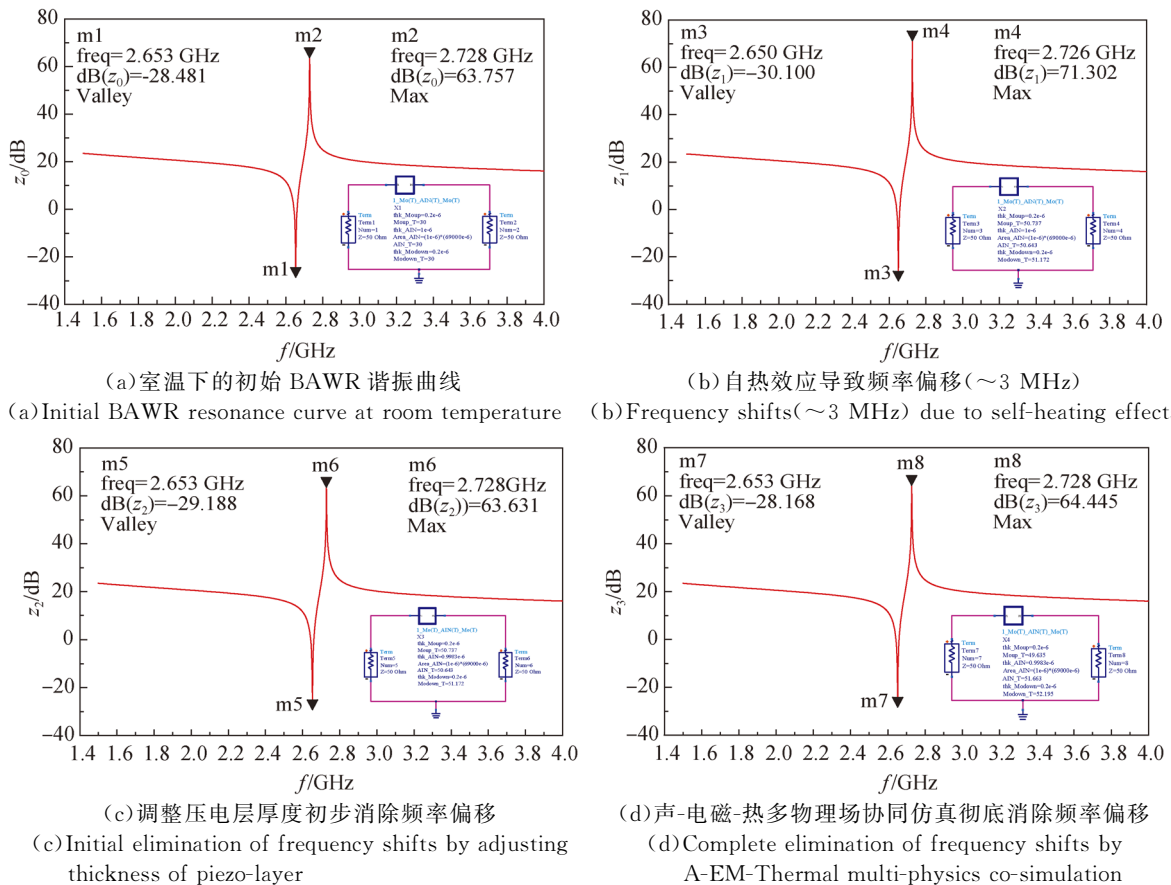


图 8 高功率 BAWR (3 W) 的修正设计

Fig. 8 Modification scheme of high power BAWR (3 W)

5 结论

本文建立了一种声-电磁-热多物理场协同仿真方法,以预测自热所致的高功率 BAWR 的频率偏移;提出了通过调整 BAWR 中压电层厚度进行

设计修正的方案和具体措施。以一个高功率 (3W) BAWR 为案例,验证了高功率 BAWR 自热效应的声-电磁-热多物理场协同仿真方法的可行性。修正结果表明,该案例中将 AlN 压电层厚度减薄 1.7 nm,可彻底消除自热效应所致的 3 MHz 频率偏移,验证了修正方案及措施的有效性。

参考文献:

- [1] AIGNER R. SAW and BAW technologies for RF filter applications: A review of the relative strengths and weaknesses [C]. *Proceedings of the IEEE Ultrasonics Symposium*, 2008:582-589.
- [2] RUBY R. Review and comparison of bulk acoustic wave FBAR, SMR technology [C]. *Proceedings of the IEEE Ultrasonics Symposium*, 2007: 1029-1040.
- [3] GALIPEAU J, CHANG R E. Design considerations for high power BAW duplexers for base station applications [C]. *Proceedings of the IEEE Ultrasonics Symposium*, 2015:1-4.
- [4] 张慧金,董树荣,赵士恒,等. FBAR 滤波器及其组件; CN, CN102111124A [P]. 2011.
ZHANG H J, DONG SH R, ZHAO S H, *et al.*. *FBAR Filter and Its Components*; CN, CN102111124A [P]. 2011. (in Chinese)
- [5] HEEREN W, FATTINGER M, FATTINGER G, *et al.*. Impact of thermo-mechanical stress on the TCF of WLP BAW filters [C]. *Proceedings of the IEEE Ultrasonics Symposium*, 2016:1-4.
- [6] 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.
- [7] BI F, BARBER B. Bulk acoustic wave RF technology [J]. *IEEE Microwave Magazine*, 2008, 9(5): 65-80.
- [8] IVIRA B, FILLIT R Y, NDAGIJIMANA F, *et al.*. Self-heating study of bulk acoustic wave resonators under high RF power [J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 2008, 55(1): 139-147.
- [9] HASSINE N B, MERCIER D, RENAUX P, *et al.*. Self-heating under RF power in BAW SMR and its predictive 1D thermal model [C]. *Proceedings of the IEEE Frequency Control Symposium*, 2009: 237-240.
- [10] TAG A, WEIGEL R, HAGELAUER A, *et al.*. Influence of temperature distribution on behavior, modeling, and reliability of BAW resonators [C]. *Proceedings of the IEEE Reliability Physics Symposium*. 2014:5C. 5. 1-5C. 5. 7.
- [11] TAG A, WEIGEL R, HAGELAUER A, *et al.*. Influence of dissipated power distribution on BAW resonators' behavior [C]. *Proceedings of the IEEE Ultrasonics Symposium*, 2014:2627-2630.
- [12] THALHAMMER R, AIGNER R. Energy loss mechanisms in SMR-type BAW devices [C]. *Proceedings of the IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest*, 2005:4.
- [13] TAG A, WEIGEL R, HAGELAUER A, *et al.*. Determination of temperature coefficients of thin film materials in RF BAW components [C]. *Proceedings of the IEEE Microwave Conference*, 2015:402-405.
- [14] YANG T, CAO Z, FELD D A. An H₂ emissions model for piezoelectric devices exhibiting strong lateral mode resonances [C] *Proceedings of the IEEE Ultrasonics Symposium*, 2017: 1-7.
- [15] 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.
JIN H. *Research on Several Problems of Thin Film Bulk Acoustic Resonator (FBAR) Technology* [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2006. (in Chinese)
- [16] ELLA J, YLILAMMI M. Modelling of ZnO-based BAWs at high signal levels [C]. *Proceedings of the IEEE Ultrasonics Symposium*, 2002:985-988.
- [17] 董树荣, 金浩, 王德苗. 薄膜声波谐振器的电磁场建模与仿真 [J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2006, 40(9):1477-1481.
DONG SH R, JIN H, WANG D M. Electromagnetic analysis of thin film bulk acoustic resonator [J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2006, 40(9): 1477-1481. (in Chinese).
- [18] IVIRA B, BENECH P, FILLIT R, *et al.*. Modeling for temperature compensation and temperature characterizations of BAW resonators at GHz frequencies [J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics & Frequency Control*, 2008, 55(2):421-430.

作者简介:



韩超(1993—),男,重庆万州人,主要从事微电子机械系统(MEMS)及其应用的研究。E-mail: hanchao54@qq.com

导师简介:



高杨(1972—),男,四川绵阳人,博士,研究员,1993年于西安理工大学获得学士学位,1996年于重庆大学获得硕士学位,2000年于北京理工大学获得博士学位,2004年于上海交通大学博士后出站,主要从事微电子机械系统(MEMS)及其应用的研究。E-mail: gaoyang@caep.cn