

体声波谐振器热行为仿真

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:为了预测体声波谐振器(BAWR)的热行为并评估其功率容量,提出一种BAWR热行为仿真方法。首先提取BAWR电磁模型中的导体表面损耗,并以此作为热仿真的热源,得到谐振器的温度分布。然后就信号馈送边、有源区形状、功率容量这3方面进行了研究。仿真结果表明,为了减弱BAWR的自热效应,信号馈送宜遵循“长边馈入、长边馈出”原则;有源区形状对自热效应影响甚小;所设计的BAWR功率容量可达3 W。

关键词:体声波谐振器;自热效应;信号馈送边;功率容量;有源区形状

中图分类号:TN702;O532;O642.3 **文献标识码:**A **DOI:**10.11977/j.issn.1004-2474.2018.04.008

Thermal Behavior Simulation of Bulk Acoustic Wave Resonator

HAN Chao¹, GAO Yang², ZHANG Dapeng^{1,3}

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

2. Institute of Electronic Engineering, CAEP, Mianyang 621999, China; 3. State Key Laboratory of Particle Detection and Electronics, Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: In order to predict the thermal behavior of bulk acoustic wave resonator (BAWR) and evaluate the power handling capacity, a BAWR thermal behavior simulation method is proposed. Firstly, the surface loss of the conductor in the BAWR electromagnetic model is extracted and used as a heat source for the thermal simulation to obtain the temperature distribution of the resonator. Then the signal-feeding-edge, active area shape and power handling capacity are investigated. The simulation results show that, in order to weaken the self-heating effect of BAWR, the signal feeding should follow the principle of “long edge feed-in, long edge feed-out”; the shape of the active area has little effect on the self-heating effect, and the power handling capacity of the designed BAWR can reach 3 W.

Key words: bulk acoustic wave resonator (BAWR); self-heating effect; signal feeding edge; power handling capacity; active area shape

0 引言

体声波谐振器(BAWR)是BAW滤波器中的基本单元^[1]。当BAW滤波器承受较大输入功率时,BAWR会发生自热效应^[2],这会使滤波器的传输曲线下滑,造成性能退化^[3]。如果输入功率过大,BAW滤波器甚至会出现器件自毁现象,如压电层AlN薄膜破裂^[4]。为避免实际器件的首次测试因热不稳定性而失败,需要在设计之初对BAWR的热行为及功率容量做出预先考虑。Brice Ivira等^[5]提出一种纯热模拟法来研究BAWR的自热效应。其

在BAWR的AlN薄膜中施加一个功率密度源来定义谐振器中发生的焦耳热,功率密度源由谐振器的输入功率与体积的比得到。由于该方法是将施加于BAWR的输入功率作为谐振器的耗散功率,未考虑到谐振器反射的部分功率^[6],从而使仿真温度值偏大。N. B. Hassine等^[7]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。但该模型只能算出BAWR沿不同叠层的温度梯度,而无法得到BAWR的3D温度分布。A tag等^[8]提出一种热仿真法,先由1D声学仿真和3D电磁仿真得到BAWR的反射系数,再由反射系

收稿日期:2018-02-08

基金项目:国家自然科学基金资助项目(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(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(2016KF-02)

作者简介:韩超(1993-),男,重庆万州人,硕士生,主要从事微电子机械系统的研究。E-mail:hanchao54@qq.com。通信作者:高杨(1972-),男,四川绵阳人,研究员,博士,主要从事微电子机械系统的研究。E-mail:gaoyang@caep.cn。

数和输入功率计算出谐振器的耗散功率,并以此作为热仿真的热源,得到 BAWR 的空间温度分布。这种方法的不足是由反射系数算出的耗散功率只能体现整体耗散功率大小,而不能体现出耗散功率在谐振器内部的分布情况^[9]。本文针对 BAW 滤波器中的一个 BAWR 进行了自热效应研究,提出了一种电磁-热耦合仿真法来预测 BAWR 的热行为,并就信号馈送边、有源区形状、功率容量这 3 方面进行了讨论。

1 原理

当对 BAWR 输入一定功率时,BAWR 会发生自热效应,使器件温度升高。由于 BAWR 叠层材料的物理属性(如刚度系数、密度、厚度)与温度相关^[10],所以,器件温度上升将会改变叠层材料属性,使谐振频率发生偏移,即 BAW 器件会出现性能退化。如果输入功率过大,自热效应甚至会导致 BAWR 出现结构失效,如压电薄膜发生破裂。这种结构失效的情况是由于热量集中导致薄膜翘曲,使局部电流密度增加,并进一步加剧了自热效应,最终使薄膜破裂^[4]。

热源是自热效应的一个关键问题。BAWR 自热效应的热源来自于多种损耗机制^[11],如压电层的介质损耗,顶、底电极的欧姆损耗,粘弹性损耗等,这些损耗最终都将以热量的形式耗散。常见的热源(即耗散功率)计算方法有两种:

1) 通过电压、电流计算耗散功率。电压、电流数值常在电路级仿真软件中得到^[12]。这种热源提取方式是基于一个条件:假设施加的所有电功率都转化为热,即 BAWR 中无波泄露损耗^[13]。

2) 通过 S 参数和输入功率计算耗散功率^[6]。这种热源提取方法是基于耗散功率等于入射功率减去反射功率和透射功率这个物理守恒原则。根据谐振器电路连接方式是单端口连接还是双端口连接,分别存在以下两种计算式:

$$P_d = P_{in}(1 - |S_{11}|^2) \quad (1)$$

$$P_d = P_{in}(1 - |S_{11}|^2 - |S_{21}|^2) \quad (2)$$

式中: P_d 为谐振器的耗散功率; P_{in} 为谐振器的输入功率; S_{11} 为输入反射系数; S_{21} 为正向传输系数。

上述两种方法提取的耗散功率是一个具体数值,不能得到关于空间位置分布的耗散功率。

2 方法

BAWR 自热效应中的主要耗散功率是其金属

电极处产生的导体欧姆损耗^[9,11,14]。采用图 1 中的仿真方法,可以提取 BAWR 的欧姆损耗,并建立热仿真模型来预测器件温度。具体流程是:首先在电磁仿真软件 HFSS 中建立 BAWR 的 3D 电磁模型^[15],进行有限元仿真,得到电极的表面电流密度,从而得到导体欧姆损耗(即耗散功率密度)。电磁模型中计算耗散功率密度为

$$Q = \frac{J^2}{\sigma} \quad (3)$$

式中: Q 为耗散功率密度; J 为电流密度; σ 为电导率。

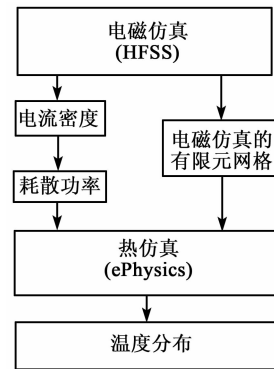


图 1 BAWR 热仿真方法

这种方法提取的耗散功率具有空间分布的特点。利用 HFSS 中的剪切板控件将 BAWR 的 3D 电磁模型导入热仿真软件 ePhysics 中,设置材料和边界条件,这样可以快速地由电磁模型构建出 BAWR 的热仿真模型。再通过软件自带的数据链接功能实现电磁-热耦合。在分析求解中需设置“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仿真中,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 ePhysics 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,为热稳态分析提供了输入条件。热模型中计算温度分布为

$$-\nabla(\mathbf{K}\nabla T) = Q \quad (4)$$

式中: Q 为耗散功率密度,可从外部导入,也可在软件内部设置; $\mathbf{K}$ 为热传导向量,取决于所选材料; ∇T 为温度梯度。

按照上述仿真方法,对 BAWR 结构参数(见表 1)进行热仿真。在 HFSS 中构建电磁模型,设置输

入功率为 1 W,由仿真得到电极的电流密度,如图 2 所示。将 BAWR 的 3D 电磁模型导入到 ePhysics 中,设置环境温度为 30 ℃,边界条件为热传递,仿真得到 BAWR 的温度云图,如图 3 所示。由图 3 可知,整个 BAWR 结构中的最高温度为 45.243 ℃,出现在电极处;最低温度为 33.069 ℃,出现在硅衬底中。压电层的最高温度达到 40.245 ℃。整个有源区的温度呈中间低、四周高的特点,这与图 2 中电流密度分布趋势相吻合。此外,顶、底电极引线处存在明显的热区域。这是由于在 HFSS 中功率信号在此馈入,且电极引线中间部分的热量会向硅衬底扩散,所以,在电极引线处会看到明显的温度梯度。

表 1 BAWR 结构参数

	顶电极 (Mo)	压电层 (AlN)	底电极 (Mo)	衬底 (Si)
厚度/ μm	0.2	1.0	0.2	100.0
有源区面积/ μm^2	69 000			

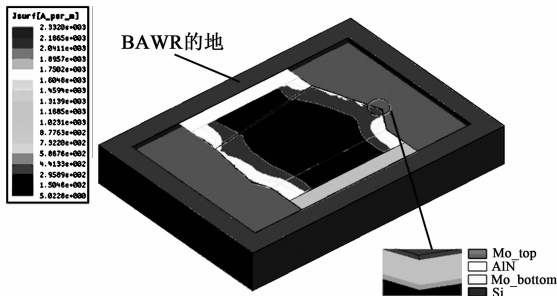


图 2 BAWR 的电磁仿真结果

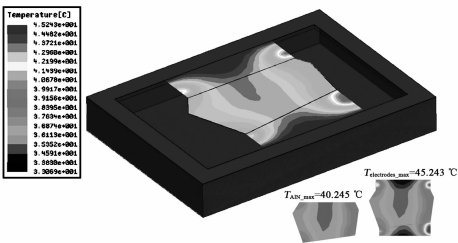


图 3 BAWR 热仿真结果(环境温度为 30 ℃)

3 结果与讨论

3.1 信号馈送边对 BAWR 自热效应的影响

为了抑制寄生模式,常将 BAWR 设计为如四边形、五边形、六边形等不规则的多边形。因此,BAWR 有源区形状将不具有对称性,信号馈送会有多种选择,如可以从最长的边馈入、从最短的边馈出。为了研究信号馈送边是否会对 BAWR 的自热效应产生影响,设计了 A、B 两组仿真实验,如图 4 所示。实验 A 中,信号从 BAWR 的最长边馈入,并分别从其他边馈出;实验 B 中,信号从最短边馈入,并分别从其他边馈出。在每组实验中,输入功率均设置为 1 W。按照上述方法进行仿真,可以得到压电层 AlN 的最高温度($T_{\text{AlN_max}}$),如表 2 所示。

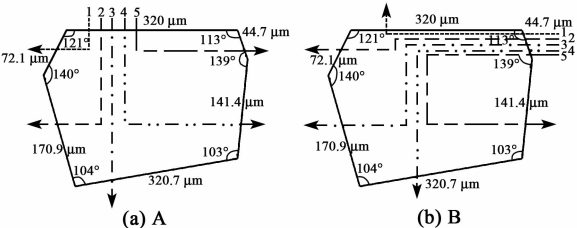


图 4 仿真实验

表 2 AlN 温度值

$T_{\text{AlN_max}}/\text{℃}$	A					B				
	A-1	A-2	A-3	A-4	A-5	B-1	B-2	B-3	B-4	B-5
	94.072	58.157	40.307	64.239	124.320	123.740	120.670	118.870	120.670	135.580

由表 2 可知,A 组实验(最长边馈入)中的 A-3(次长边馈出)所对应的温度最低(为 40.307 ℃),A 组实验中的 A-5(最短边馈出)所对应的温度最高(达到 124.32 ℃)。总的来看,仿真温度值会随着信号馈出边长度的减小而上升。从 B 组实验(最短边馈入)结果可看到,各仿真温度值相差不大,且都很高,约为 120 ℃。

分析仿真结果可知,当信号馈送遵循“长边馈入、长边馈出”时,BAWR 的自热效应较弱,器件温度也会较低;当谐振器的信号从短边馈入时,不论馈出边长度如何,自热效应都会很强,器件温度也会很高。

3.2 有源区形状对 BAWR 自热效应的影响

在设计过程中,如果 BAWR 的有源区面积大小已经确定,那么保持面积不变,将会存在多种有源区形状选择。所以,在 BAW 滤波器布局中,设计者常会根据布局需要选择合适的有源区形状。但是,从热角度考虑,这种有源区形状选择需要满足以下前提,即有源区形状不会对自热效应产生明显影响。为了研究不同的有源区形状是否会对 BAWR 的自热效应产生影响,设计了有源区形状分别为四边形、五边形、六边形的 3 个谐振器。这 3 个谐振器的有源区面积($69\,000\,\mu\text{m}^2$)和馈入功率(1 W)均保持一

致,且遵循前文所述的“长边馈入、长边馈出”的信号馈送原则,得到的热仿真结果如表 3 所示。

表 3 不同有源区形状下的温度值

	四边形	五边形	六边形
$T_{\text{AlN}_{\text{max}}}/^{\circ}\text{C}$	39.693	39.127	40.307

由表 3 可知,四边形、五边形、六边形的温度值非常接近。由此可知,有源区形状对 BAW 自热效应的影响甚小。所以,在 BAW 滤波器的布局中可灵活选择有源区形状,这不会对 BAW 器件的热行为产生明显影响。

3.3 功率容量

当输入功率过大时,BAWR 出现的自热效应会非常明显,可能会导致器件出现失效。为避免这种情况,需要预先对 BAWR 的功率容量进行评估。由于温度是 BAWR 功率容量的一个重要限制因素^[16],故而可从温度角度来评估功率容量。分别对实验 A-3 中的 BAWR 施加 1 W、2 W、3 W 的输入功率,得到压电层的最高温度 $T_{\text{AlN}_{\text{max}}}$ 和电极层的最高温度 $T_{\text{electrodes}_{\text{max}}}$,如表 4 所示。由仿真结果可知,当对 BAWR 输入功率为 3 W 时,BAWR 压电层的最高温度为 61.078 $^{\circ}\text{C}$,电极层的最高温度为 79.203 $^{\circ}\text{C}$ 。

表 4 不同输入功率下的温度值

	1 W	2 W	3 W
$T_{\text{AlN}_{\text{max}}}/^{\circ}\text{C}$	40.307	50.719	61.078
$T_{\text{electrodes}_{\text{max}}}/^{\circ}\text{C}$	46.275	62.802	79.203

通过下式可得出自热效应会造成谐振器的谐振频率偏移约为-4 MHz,频率偏移量

$$\Delta f = f_0 \cdot \Delta T \cdot TCF / 10^6 \tag{5}$$

式中: $f_0=2.642\text{ GHz}$ 为常温下的谐振频率; $\Delta T=49.203\text{ }^{\circ}\text{C}$ 为温度变化量; $TCF\approx(-22\sim-31)\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 为 BAWR 的频率温度系数^[17],此处取 $-31\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 。以下讨论自热效应对 BAW 滤波器性能的影响。由于滤波器的阶数和谐振器有源区面积主要影响带外抑制,故可从简单的一阶 BAW 滤波器来讨论自热效应对滤波器的通带和插损的影响。如图 5 插图所示,一阶滤波器由 1 个串联 BAWR 和 1 个并联 BAWR 组成。并联 BAWR 的并联谐振频率几乎等于串联 BAWR 的串联谐振频率。此一阶滤波器的传输曲线如图 5 所示。由图 5 可看到,自热效应会使滤波器的传输曲线向下偏移,上通带插损 ΔIL 增加(约 0.238 dB@2.697 GHz)。总的来看,此滤波器的性能并未发生明显退化。从这

个角度来说,所设计的 BAWR 的功率容量可达 3 W。

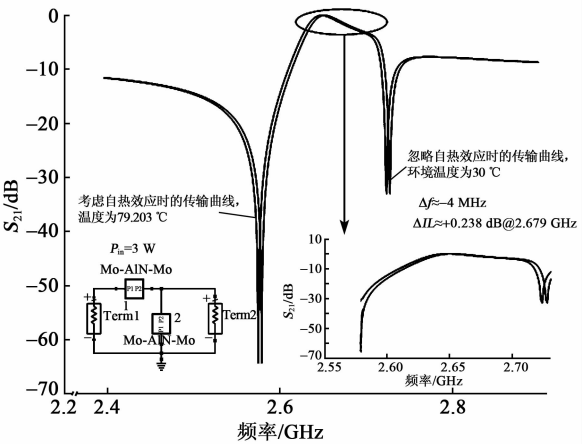


图 5 一阶 BAW 滤波器

4 结束语

本文采用电磁-热耦合的有限元法,数值模拟了 BAWR 的自热效应,分析了信号馈送边对自热效应的影响机制,并提出“长边馈入、长边馈出”的信号馈送原则。在遵循此原则的基础上,评估了所设计的 BAWR 的功率容量水平,可达到 3 W。提出了 BAWR 的有源区形状对其自热效应的影响甚小,因此,在设计 BAWR 时,通过该信号馈送原则可提升谐振器的热稳定性,并可用此仿真方法评估功率容量;在 BAW 滤波器布局中,根据布局需要可灵活选择 BAWR 的有源区形状。

参考文献:

[1] BI F Z, BARBER B P. Bulk acoustic wave RF technology[J]. Microwave Magazine IEEE, 2008, 9(5): 65-80.

[2] AIGNER R, HUYNH N H, HANDTMANN M, et al. Behavior of BAW devices at high power levels[C]//S. l.: IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest, 2005.

[3] 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.

[4] LARSON J D I, RUBY J D I, BRADLEY R C, et al. Power handling and temperature coefficient studies in FBAR duplexers for the 1 900 MHz PCS band[C]//S. l.: Ultrasonics Symposium IEEE, 2000: 869-874.

[5] 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.