

薄膜体声波谐振器的热学分析

张 睿¹, 焦向全¹, 马晋毅², 杜 波², 钟 慧¹, 石 玉¹

(1. 电子科技大学 电子薄膜与集成器件国家重点实验室, 四川 成都 610054; 2. 中国电子科技集团公司第二十六研究所, 重庆 400060)

摘 要:采用有限元分析软件 Comsol Multiphysics 构建谐振器三维模型, 研究器件结构、材料对其热性能的影响。固态装配型谐振器(SMR)有更好的热传导能力与热应力稳定性。在 SMR 器件中增加一层 SiO₂, 其最高稳态温度上升 7 °C。器件最高稳态温度随其谐振区面积的减小而迅速增大。当器件换用高热导率材料时, 器件最高稳态温度及其随热耗散功率增加而增大的幅度明显降低。

关键词:薄膜体声波谐振器; 有限元; 热学分析; COMSOL; 大功率

中图分类号: TN713+.2 **文献标识码:** A

Thermal Characteristics Analysis of Thin Film Bulk Acoustic Resonator

ZHANG Rui¹, JIAO Xiangquan¹, MA Jinyi², DU Bo², ZHONG Hui¹, SHI Yu¹

(1. State Key Lab. of Electronic Thin Films and Integrated Devices, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China;

2. 26th Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Chongqing 400060, China)

Abstract: A finite element simulation software Comsol Multiphysics was employed to build three-dimensional bulk acoustic wave(BAW) resonators model. The influences of different structure and materials on the thermal characteristics of the BAW resonators were investigated. The calculation results revealed that the solid mounted resonators(SMR) had better thermal reliability than that of film bulk acoustic resonators. Adding SiO₂ layer into the SMR will increase the steady-state temperature of 7 °C. The highest steady-state temperature will increase rapidly with the decrease of the resonant area of SMR. The steady-state temperature decreased greatly when the high thermal conductivity materials are used to replace materials of low thermal conductivity in SMR.

Key words: film bulk acoustic wave resonator; finite element; thermal characterization; Comsol; high power

0 引言

近年来,随着无线通信技术的不断发展,市场对通信系统高频化、小型化、集成化的要求愈发迫切。目前,通信系统中很多频率控制组件,如低噪声放大器、固态功率放大器、混频器等都能集成到一个芯片中,通信系统的尺寸主要由大量分离的无源器件决定,如谐振器、滤波器、耦合器等。有效降低无源器件的尺寸,实现无源器件的集成是解决无线通信系统小型化、集成化及满足市场需求的关键。

基于微机电系统(MEMS)技术制备实现的薄膜体声波谐振器以其小体积,易集成及优良的电性能为无线通信系统前端集成提供了良好的解决方

案^[1-3]。薄膜体声波谐振器通过正、逆压电效应实现电磁波与声波的相互转换。由于声波的波长比电磁波的波长约小 5 个数量级,因此,相同谐振频率下薄膜体声波谐振器的尺寸能做的很小。随着薄膜体声波器件应用范围的不断拓展,其越来越多地被用在大功率场合。器件输入功率的不断增加,导致器件产生的热效应愈加显著,过大的输入功率将导致器件产生过高的温度与较大的热应力,进而导致器件可靠性降低甚至失效。本文通过有限元法建立薄膜体声波器件三维模型,对器件进行热学分析,研究器件结构、材料对器件热学性能的影响,为器件在大功率条件下的应用奠定基础。

收稿日期:2015-04-29

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61101038,61471086);四川关键技术研究发展基金资助项目(2011GZ0220);中央高校基础研究基金资助项目(ZYGX2012J031)

作者简介:张睿(1988-),男,四川广汉人,博士生,主要从事射频微波器件的设计与研究。E-mail: windzr@qq.com。通讯作者:石玉(1965-),男,甘肃兰州人,教授,博导,主要从事电子信息材料与元器件的研究。E-mail: wind.zr@163.com。

1 薄膜体声波谐振器热学分析原理

本文利用有限元法对器件进行热学分析。有限元法通过将实际模型离散成互不重叠的单元,并在每个单元内选择合适的节点构造插值点,然后将实际物理问题的未知量改写成依靠这些节点的线性方程组,最后通过相应的数值方法求解结果^[4]。薄膜体声波谐振器离散后,每个单元所依赖的热力学方程组为

$$\rho C_p u \cdot \nabla T = \nabla \cdot (k \nabla T) + Q \quad (1)$$

$$\sigma = C : S \quad (2)$$

$$-\nabla \cdot \sigma = F_v \quad (3)$$

式中: ρ 为材料密度; C_p 为材料比热; k 为材料热导率; u 为器件位移场; Q 为热源; C 为材料刚度矩阵; S 为应变; σ 为应力; T 为温度; F_v 为体力; ∇ 为散度专用算符。

薄膜体声波器件工作时的热量产生主要由介电损耗、机械损耗及焦耳损耗 3 种因素导致。器件的热效应主要由压电层的介电损耗决定^[5],本文中器件的热源 Q 为压电层 AlN 的介电损耗。通常热的传播方式有热传导、对流及辐射 3 种^[6]。由于热量在薄膜体声波器件中的传播方式以热传导为主,本文忽略对流及辐射对器件热场的影响。同时,伴随热量在器件中的传播会产生相应的热应力。

本文利用 Comsol Multiphysics 软件对器件进行三维有限元分析。利用该软件进行建模仿真分为器件几何模型定义,器件材料选择,器件物理场指定,器件网格划分,求解及结果后处理^[7]5 步骤。本文选择软件中的热学模块对器件进行三维有限元仿真。器件的网格采用自由剖分三角形的方法进行划分,网格的精度选择为 Normal。求解器为稳态物理场求解。仿真中使用的材料参数如表 1 所示。根据器件实际应用环境,固定器件硅衬底底面温度为室温(293.15 K),器件侧面位移为 0。

表 1 热仿真用材料参数

	热导率/ [W/(m·K)]	热容/ [J/(kg·K)]	热膨胀系数/ (10^{-6} /K)	密度/ (kg/m ³)
Mo	138.0	251	4.8	10 200
AlN	150.0	760	4.4	3 300
SiO ₂	1.4	730	0.5	2 200
W	174.0	132	4.5	19 350
Al	237.0	904	23.1	2 700
Si ₃ N ₄	20.0	700	2.3	3 100
Si	148.0	712	2.6	2 330

2 仿真结果与分析

基于声波反射实现方式的不同,薄膜体声波谐振器主要有背刻型薄膜体声波谐振器、空腔型薄膜体声波谐振器及固态装配型薄膜体声波谐振器 3 种结构。本文首先比较了这 3 种结构器件的热性能。器件三维模型如图 1 所示。3 种结构器件的压电核心结构一致,均为 Mo/AlN/Mo,其厚度分别为 0.2 μ m/2 μ m/0.2 μ m。3 种结构器件的顶电极面积均为 100 μ m $\times$ 100 μ m,其余部分每层面积均为 200 μ m $\times$ 200 μ m。器件用硅衬底,厚为 300 μ m。背刻型结构器件与空腔型结构器件的支撑层材料为 Si₃N₄,其厚为 0.2 μ m。背刻型器件硅衬底底面中心被刻蚀掉 100 μ m $\times$ 200 μ m $\times$ 300 μ m。空腔型器件硅衬底表面与顶电极对应处刻蚀出 100 μ m $\times$ 100 μ m $\times$ 1 μ m 的空腔。固态装配型器件采用 4 层布喇格反射层,材料为 W/SiO₂,厚度分别为 732.69 nm 及 822.3 nm。

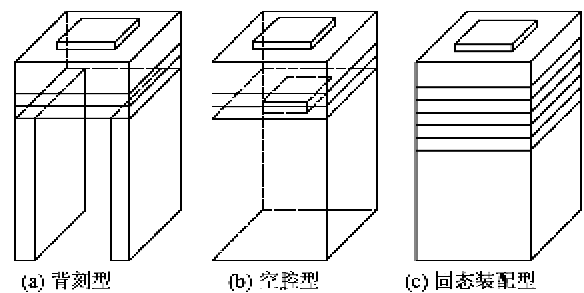


图 1 3 种结构薄膜体声波谐振器

器件最高稳态温度随压电层损耗功率的变化如图 2 所示。由图可知,3 种结构的器件最高稳态温度随压电层热功率的增加而增大。其中,在相同热耗散功率下,背刻型器件的稳态温度最大,而固态装配型结构器件温度最低,空腔型器件稳态温度居中。器件热应力随压电层损耗功率的变化如图 3 所示。器件热应力与器件稳态温度随功率的变化一致,背刻型器件具有最大的热应力,而固态装配型器件的热应力水平最低,空腔器件的热应力水平居中。从图 2、3 可看到,由于热量在器件中主要以热传导的方式传播,空腔的存在会阻碍器件的散热,因此,以固体-空气界面反射声波的背刻型器件及空腔型器件的散热效果均比固态装配型器件差。从图 1~3 中可看到,固态装配型器件能承受更高的热耗散功率,更适合器件在大功率输入环境中的应用。在下面的研究中本文将进一步讨论固态装配型器件的材

料、结构对器件热性能的影响。固态装配型器件模型如图4所示。图中, A 为谐振区面积。

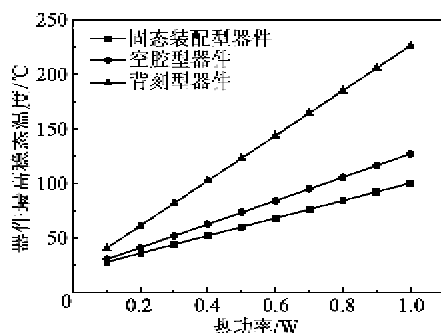


图2 器件最高稳态温度随热功率的变化

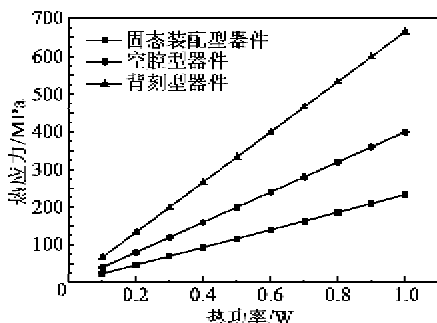


图3 器件最大热应力随热功率的变化

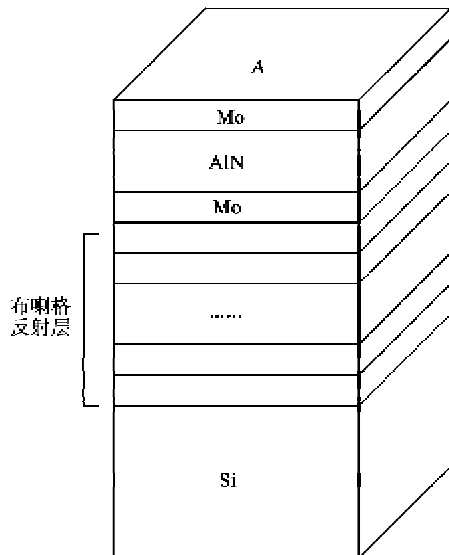


图4 固态装配型器件三维模型

固态装配型器件通过 $1/4$ 波长布喇格反射层实现对声波的反射, 多层布喇格反射层的使用能有效保证器件的电性能。高声阻抗材料 W 及低声阻抗材料 SiO_2 以其较高的声阻抗比, 成为目前固态装配型器件最常用的布喇格反射层材料。图5为不同布喇格反射层层数对器件稳态温度的影响。从图5中可看到, 器件布喇格反射层增加一层 W 对器件稳态温度几乎无影响, 而增加一层 SiO_2 , 器件稳态温

度便迅速增加约 $7^\circ C$ 。这是由于器件中 SiO_2 层的热导率 ($1.4 W/(m \cdot K)$) 远小于 W 层的热导率 ($174 W/(m \cdot K)$), 器件中 SiO_2 层是制约器件热传导的主要因素。因此, 在大功率器件的设计过程中不宜过多使用热导率很低的 SiO_2 层。

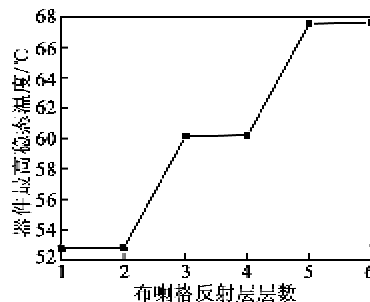


图5 布喇格反射层层数对器件稳态温度的影响

器件 A 对器件稳态温度的影响如图6所示。研究中器件的谐振区为正方形, 面积从 $2500 \mu m^2$ ($50 \mu m \times 50 \mu m$) 增大到 $90000 \mu m^2$ ($300 \mu m \times 300 \mu m$), 压电层损耗功率为 $0.5 W$ 。由图可知, 器件稳态温度随 A 的增大先迅速减小后趋于稳定。在相同耗散功率的条件下, 器件 A 越小, 器件功率密度越大, 导致器件稳态温度越大。过小的 A 虽然有利于进一步提高器件集成化, 但同时会产生过高的温度, 使器件在大功率应用场合下失效。

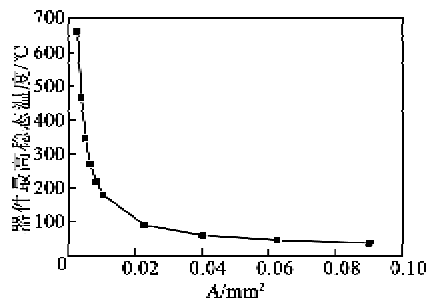


图6 A 对器件稳态温度的影响

从图5中可看到, 器件 SiO_2 层的低热导率制约了固态装配型薄膜体声波谐振器在大功率场合下的应用。因此, 在本文的仿真中我们使用同样具有低声阻抗, 但具有高热导率的 Al 层代替 SiO_2 层作为器件的布喇格反射层。图7为不同布喇格反射层材料对器件稳态温度的影响。由图可知, 相同热耗散功率下, 使用 W/Al 作为布喇格反射层器件的稳态温度明显低于使用 W/SiO_2 作为布喇格反射层器件的稳态温度。同时, 使用 W/Al 作为布喇格反射层的器件, 其稳态温度随热功率的增加而增大的幅度明显减小。

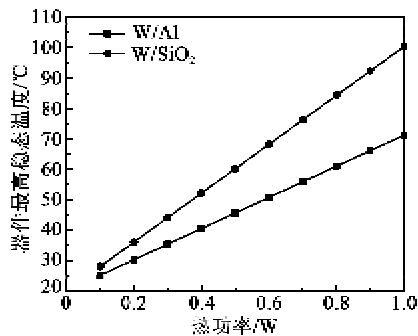


图7 不同布喇格反射层材料对器件稳态温度的影响

3 结论

本文使用多物理场仿真软件 Comsol Multiphysics 构建薄膜体声波谐振器三维有限元模型,对薄膜体声波谐振器进行热学仿真。比较了背刻型、空腔型和固态装配型 3 种不同类型的薄膜体声波谐振器的热性能。讨论了固态装配型器件布喇格反射层层数、布喇格反射层材料、谐振区面积对器件热性能的影响。结果表明,相对于背刻型器件及空腔型器件,固态装配型器件拥有更好的散热能力与力稳定性,更适宜大功率场合下的应用。同时,为了使固态装配型器件更适宜大功率条件下的应用,器件在设计时应注意以下几个问题:

- 1) 器件布喇格反射层中若含有低热导率的材料,则应尽量减少低热导率材料的层数。
- 2) 器件设计中不应将器件谐振区面积设计的过小,过小的谐振区面积会迅速提高器件的最高稳态温度,造成器件失效。
- 3) 使用高热导率材料作为器件布喇格反射层能有效提高器件热传导能力,使器件适宜大功率场合下的应用。

参考文献:

- [1] 杜波,马晋毅,江洪敏,等. 微声薄膜耦合谐振滤波器有限元建模与仿真[J]. 压电与声光, 2012, 34(5): 672-675.
DU Bo, MA Jinyi, JIANG Hongmin, et al. Finite element modeling and simulation of film bulk acoustic wave coupling resonator filters[J]. Piezoelectrics & Acousto-optics, 2012, 34(5): 672-675.
- [2] FRANK Z B, BRADLEY P B. Bulk acoustic wave RF technology[J]. IEEE Microwave Magazine, 2008, 9(5): 65-80.
- [3] ZHANG R, JIAO X Q, YANG J, et al. Electrode influence on effective electromechanical coupling coefficient of thin film bulk acoustic resonators[J]. Mater Res Innov, 2014, 18(S4): 606-609.
- [4] 王刚, 安琳. COMSOL Multiphysics 工程实践与理论仿真[M]. 北京: 电子工业出版社, 2012.
- [5] UCHINO K, HIROSE S. Loss mechanisms in piezoelectrics: how to measure different losses separately[J]. IEEE Trans Ultrason, Ferroelect, Freq Contr, 2001, 48(1): 307-321.
- [6] THEODORE L B, ADRIENNE S L, FRANK P I, et al. Fundamentals of heat and mass transfer[M]. New York: John Wiley & Sons, 2011: 2-12.
- [7] 吕琼莹, 杨艳, 焦海坤, 等. 基于 COMSOL Multiphysics 超声波电机的谐振特性分析[J]. 压电与声光, 2012, 34(6): 864-867.
LV Qiongying, YANG Yan, JIAO Haikun, et al. The Resonant feature analysis of ultrasonic motor based on COMSOL multiphysics[J]. Piezoelectrics & Acousto-optics, 2012, 34(6): 864-867.

读者信息反馈卡(2016年第1期)

- ▲您目前最感兴趣的技术问题: _____
- ▲您认为本期最佳文章: _____ 理由: _____
- ▲您认为本期欠佳文章: _____ 理由: _____
- ▲您希望本刊增加哪些内容: _____
- 读者姓名: _____ 通信地址: _____ 邮编: _____

复印有效