文章编号:1004-2474(2018)06-0901-04

一种基于柔性基底的薄膜体声波谐振器

杨 泰¹,张 根¹,秦康宁¹,杜 波^{1,2},蒋 欣^{1,2},马晋毅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:为了能有效解决柔性基底体声波谐振器热稳定性不足及功率容量不足等问题,该文提出了一种新型的基于柔性基底的薄膜体声波谐振器。该谐振器的硅衬底上开设有一定数量的垂直上凸型结构,该结构既能有效抑制寄生模量,又能减小器件最高稳态温度和最大热应力。通过有限元分析软件 Comsol Multiphics 对谐振器进行仿真,结果表明,器件每增加一个上凸型结构,其最高稳态温度下降了4℃,最大热应力下降了1×10⁴ GPa。与以往的柔性基底薄膜体声波谐振器相比,它具有更好的热传导能力和热应力稳定性。

关键词:柔性基底;薄膜体声波谐振器;Comsol;大功率;热学分析;微机电系统(MEMS) 中图分类号:TN713+.2;TN384 **文献标识码:**A **DOI**:10.11977/j, issn. 1004-2474. 2018. 06. 023

A Thin Film Bulk Acoustic Resonator Based on Flexible Substrate

YANG Tai¹, ZHANG Gen¹, QIN Kangning¹, DU Bo^{1,2}, JIANG Xin^{1,2}, MA Jinyi², ZHONG Hui¹, SHI Yu¹

(1. State Key Laboratory of Electronic Thin Films and Integrated Devices, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China; 2. The 26th Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Chongqing 400060, China)

Abstract: In order to solve the problems of insufficient thermal stability and insufficient power capacity of the flexible base film bulk acoustic resonator, a new type of thin film bulk acoustic resonator based on flexible substrate is proposed in this paper. The silicon substrate of resonator has a certain number of embossments; the structure can effectively suppress the parasitic resonance mode, but also can reduce the device maximum steady-state temperature and maximum thermal stress. The simulation results of the finite element analysis software Comsol Multiphics show that the maximum steady-state temperature decreases by 4 $^{\circ}$ C for each additional embossment, and the maximum thermal stress decreases by 1×10^4 GPa. Compared with the conventional flexible substrate thin film bulk acoustic resonator, it has better thermal conductivity and thermal stress stability.

Key words: flexible substrate; film bulk acoustic resonator; Comsol; high power; thermal analysis; MEMS

0 引言

随着无线通信系统向着小型化、高频化、集成化的方向发展,传统的介质滤波器和声表面波滤波器 难以满足小型化和高频化的要求,薄膜体声波谐振器(FBAR)组成的滤波器成为当今无线通信系统的 发展趋势。

对于体声波谐振器来说,"三明治结构"是谐振器主体部分,谐振时的能量被限制在这部分,根据器件反射声波的方式,将体声波谐振器分为两大类:

1) 固态配装型(SMR),其工作原理是利用 1/4 波长厚度的高声阻抗层和低声阻抗层相间排列构成 反射层,实现声波的反射。

2)空腔型薄膜体声波谐振器,其工作原理是利用声波在底电极或支撑层与空气的交界面发生反射,将声波限制在压电层,实现谐振。

但上述两种结构的制备工艺复杂,对工艺设备 要求高,目前仅有几家公司掌握该技术。因此,能够 降低工艺复杂度的 FBAR 新型结构已成为当前的 研究热点。目前较常用的结构是以声阻抗接近于空 气的柔性基底作为衬底,进而能够避免使用传统空 腔结构或布喇格反射层结构而实现器件性能,但柔 性基存在的问题主要是散热性。

收稿日期:2018-01-30

基金项目:国家自然基金资助项目(61471086);中国工程物理研究院超精密加工技术重点实验室开发基金课题项目(2014KZ001)

作者简介:杨泰(1993-),男,湖北孝感人,硕士生,主要从事电子科学与技术的研究。通信作者:钟慧(1978-),女,湖南郴州,副教授,主要 从事微细加工及 MEMS 技术。E-mail:huizhong@uestc.com。

针对这一问题,本文中的柔性基压电薄膜体 声波谐振器在衬底表面开设一定数量的垂直上凸 型结构,是为了增大柔性低声阻抗材料与硅衬底 的接触面积,利用热传导率高的硅衬底与柔性基 底大面积的接触,可以更有效地将热量散发出去, 从而减小器件最高稳态温度,增大器件的功率容 量。平均每增加一个上凸型结构,器件最大热应 力减小的同时带有凸起的基底能有效抑制声波反 射波带来的寄生模量,从而避免反射波对基频信 号造成的干扰。

 柔性基底的薄膜体声波谐振器的研究 现状

在基于柔性基体声波谐振器的研究中,早在 2004年AVAGO公司的J.D.拉森三世等提出了一 种具有简单封装结构的FBAR^[1],提出了以声阻抗 较小的塑料材料如聚酰亚胺(PI)和声阻抗较高的难 熔金属组成布喇格反射层的器件模型。2013年, ChuF等^[2]提出了以PI和Mo组成声波反射层的 FBAR,器件的有效机电耦合系数为5.4%。2015 年,ChenG等^[3]在不同衬底上以匀胶固化液态聚酰 亚胺的方式制备了以ZnO为压电层的体声波谐振 器,器件的品质因数值可达500。这种柔性结构的 提出能极大地降低器件制备工艺复杂程度,同时可 将器件应用扩展到生化传感等领域。但与刚性材料 相比,柔性材料的热传导能力较差,所以,柔性基体 声波谐振器在热稳定性和功率容量上比传统体声波 谐振器需要进一步改善和提高。

2 柔性基底的薄膜体声波谐振器仿真原理

本文利用有限元仿真软件 Comsol Multiphysics 对器件进行仿真分析。有限元法的基本思路是 将微分方程离散化,通过适当的方法将微分方程近 似转化为代数方程组,进而可使用标准的数值计算 来求解。数值计算是通过求解偏微分方程或偏微分 方程组来实现对物理层和多物理场的仿真分析。使 用有限元法分析器件的一般步骤为:建立器件几何 模型,选择器件材料,设置器件物理场,网格划分,求 解及处理结果^[4]。

FBAR 由两部分构成:

1)功能层部分,即通常说的"三明治"结构,体 声波在压电层中激发,并在整个声路中传播。 2)结构层,包括衬底、支撑层和保护层等。当器件工作时,热量主要来自与功能层部分产生的介电损耗,而器件的每一层结构都会参与热传导,这种热量在器件中传导的同时伴随着热应力的产生^[5]。本文仿真中的器件的热源为压电层中的介电损耗。通常热量传递有热传导、对流及辐射3种。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。器件在热力学仿真所依赖的热力学方程组为

$$\rho C_{\rm p} u \cdot \nabla T = \nabla \cdot (k \nabla T) + Q \tag{1}$$

$$\sigma = C : S \tag{2}$$

$$-\nabla \cdot \sigma = F_{\rm v} \tag{3}$$

式中:ρ为材料密度;Cp为材料比热;k为材料热导 率;u为器件位移;Q为热源;C为材料刚度;S为应 变;σ为应力;T为温度;F、为体积力^[6]。

本文使用 Comsol Multiphysics 软件对器件进行三维有限元分析,使用该软件中的热学模块对器件进行仿真。我们将器件的压电层作为热源,热功率设置为 0.1 W,将器件底部温度设置成室温 (293.15 K),其他边界设置为绝热。仿真中的剖分 网格采用自由剖分三角形的方法,网格的精度为 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。

表1 仿真所用材料参数

材料	热导率/	热容/	热膨胀系数/
	$[(\mathbf{W} \cdot \mathbf{m}^{-1}) \cdot \mathbf{K}^{-1}]$	$[(J \cdot Kg^{-1}) \cdot K^{-1}]$	$[10^{-6} \cdot K^{-1})$
Mo	138.00	251	4.8
AlN	290.00	760	4.4
PI	0.15	1 100	2.0×107
Si	148.00	712	2.6

3 仿真结果与分析

3.1 PI 层厚度对性能影响分析

本文对柔性基底 FBAR 进行了电学仿真。柔 性基底薄膜体声波谐振器 A 的一般结构如图 1 所 示。器件的顶电极层和底电极层均为 Mo,其厚均 为 0.2 μm;压电层为 AlN,其厚为2 μm; PI 层使用 柔性基底 PI,当 PI 的厚度设置为 6 μm 时,仿真结 果如图 2 所示。由图 2 可见,器件 S₁₁曲线有很多干 扰,这是因为当 PI 层厚度不够时,透射到 PI 层中的 声波衰减不完全,这些声波会在 PI 层与硅衬底的交 界面发生反射,反射后的声波会进入压电层对基频



图 3 器件 A 在 PI 厚度为 10 µm 的 S11参数

由图 2、3 可以发现,使用 PI 作为基底时,需要 较大厚度,这是因为较大厚度的柔性基底不仅能 够实现对功能层声波的有效反射,还能有效抑制 渗透到硅界面的寄生谐振模量。但这种较大厚度 的柔性基底,由于其热学性能弱于刚性材料,导致 器件整体热性能不稳定,如何提高器件热性能变得 更关键。

3.2 散热结构的仿真分析

本文提到的柔性基底 FBAR 在衬底上开设有 一定数量的上凸型结构,可以通过微机电子系统 (MEMS)工艺在衬底上沉积一定数量的硅柱,或 选用热传导率高的 SiC 等刚性材料,具体的结构如 图 4 所示。在实际制备时可直接将未亚胺化的 PI 旋涂在制备好的刚性衬底上,保证柔性 PI 完全覆 盖衬底后,高温亚胺化得到 PI 层即可完成器件基 底。其后的工艺即在柔性衬底上制备"三明治" 结构。



图 4 新型柔性基底薄膜体声波谐振器 B

本文主要的仿真意义是研究柔性衬底对器件性能的影响,并未考虑电极层和谐振面积等因素带来的横向寄生模量,因此,在本文仿真中将顶电极和底电极设置相同大小,均为 200 μ m×200 μ m。顶电极和底电极仍选用 Mo,厚均为 0.2 μ m;压电层使用 AlN,厚为 2 μ m;器件使用硅作为衬底,厚为 125 μ m,硅衬底上沉积出数个大小均为 40 μ m×40 μ m×2 μ m 的方形上凸起型硅柱结构。

B 类器件的最高稳态温度(T)和最大热应力随着硅衬底中上凸型结构数量 N的变化如图 5、6 所示。由图 5 可看出,当硅衬底上不设置凸起型结构,即 N = 0 时,器件的最高稳态温度最高(达到 462 K)。由于柔性 PI 的热导率低(Q 0.15 W/(m・K)),导致器件工作时产生的热量集中在热源部分无法散出。在设置凸起型结构后,增大了热导率高的硅衬底与 PI 的接触面积,从而使器件的最高稳态温度降低,设置的凸起型结构越多,器件的最高稳态温度越低。通过仿真结果可得到每增加一个上凸型 结构,器件的最高稳态温度下降 4 °C。





图 6 最大热应力随 N 的变化

在热应力方面,没有设置上凸型结构的器件最 大热应力为 356 TPa。通常热应力来自温度变化和 热应变两方面。由表 1 可看出,PI 的热膨胀系数比 其他材料高几个数量级。在器件工作达到稳态时, PI 产生的热应变比其他材料高相应数量级,所以, 增大 PI 与硅基底的横向接触面积可有效缓解器件 的最大热应力。由图 6 可见,每增加一个上凸型结 构,器件的最大热应力减小 1×10⁴ GPa。因此,在 设计柔性器件时,若需要提高器件功率容量及器件 热稳定性,采用增大柔性材料与刚性材料的接触面 积是一种有效的解决方法。

图 7 为 N=6 时,器件 B 的 S₁₁参数曲线。由图 可见,器件 B,即本文提到的衬底包含有若干凸起结 构的 FBAR,相比器件 A 的 S₁₁曲线,其 S₁₁曲线只 有基频下的串、并联谐振点,且这两个谐振点基本未 发生变化,同时也无多余的寄生谐波的干扰。这是 因为泄露到 PI 层中的声波传播到 PI 层与硅衬底交 界处时,由于交界面存在若干凸起结构,声波不能完 全发生镜面反射,反射回来的声波会有一定的衰减, 从而不会对谐振腔中的基频产生干扰。由于低声阻 抗 PI 层厚度依旧保持 10 μm,衬底上引入若干凸起



图 7 器件 B(N=6)在 PI 层厚为 10 µm 下的 S11 曲线

结构带来的横向寄生模量对器件的整体电性能影响 是可以接受的。

4 结束语

与传统刚性材料相比,柔性基的热稳定性有欠 缺,所以,柔性基底薄膜体声波谐振器在大功率领域 的发展和应用受到一定限制。本文提出了一种基于 柔性基底的薄膜体声波谐振器,通过在刚性衬底上 设置上凸型结构,增大刚性衬底与柔性基底的接触 面积,提高器件散热能力,最终降低器件最高稳态温 度的同时减小器件热应力,使器件具有更好的热传 导能力和热稳定性。

使用多物理场仿真软件 Comsol Multiphysics 构建柔性基底薄膜体声波谐振器三维有限元模型。 通过对设置不同数量凸起结构下的器件热性能进行 仿真,验证了此法能改善器件热稳定性。仿真结构 表明,每增加一个凸起结构,器件的最高稳态温度下 降4℃,器件的最大热应力减小1×10⁴ GPa。

参考文献:

- [1] 拉森三世 J D, 艾利斯 S L, 奥什麦恩斯基 Y. 具有简单 封装的薄膜体声波谐振器(FBAR)器件:200480032450 [P]. 2006-12-20.
- [2] CHU F, LI C, WANG Z, et al. Aluminum nitride thin films on molybdenum/polyimide heterostructure for bulk acoustic resonators[J]. Rare Metal Materials & Engineering, 2013, 42(10):2023-2026.
- [3] CHEN G, ZHAO X, WANG X, et al. Film bulk acoustic resonators integrated on arbitrary substrates using a polymer support layer[J]. Scientific Reports, 2015, 5:9510.
- [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 Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics
 & Frequency Control, 2002, 48(1):307-321.
- [6] 张睿, 焦向全, 马晋毅,等. 薄膜体声波谐振器的热学 分析[J]. 压电与声光, 2016, 38(1):1-4.
 ZHANG Rui, JIAO Xiangquan, MA Jinyi, et al. Thermal characteristics analysis of thin film bulk acoustic resonaor[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2016, 38(1):1-4.