文章编号:1004-2474(2016)04-0531-04

薄膜体声波谐振器有限元仿真与设计

杜 波^{1,2},马晋毅²,蒋 欣^{1,2},江洪敏²,徐 阳²,田本朗²,金成飞²,司美菊² (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:为了抑制薄膜体声波谐振器的寄生谐振,建立了薄膜体声波谐振器的二、三维有限元模型。通过频率 响应仿真,分析了不同电极结构的谐振器在中心频率处的振动位移分布情况和频率响应曲线,评估了不同电极结 构对谐振器寄生振动的影响,并完成谐振器电极结构的优化设计,实现了谐振器寄生振动抑制。根据仿真优化结 果表明,设计并制作了工作频率在 1.873 GHz 的薄膜体声波谐振器,谐振器插入损耗 0.7 dB,无明显寄生谐振,对 设计进行了验证。

关键词:薄膜体声波谐振器;有限元;寄生振动;频率响应 中图分类号:TN65 文献标识码:A

Finite Element Simulation and Design of Film Bulk Acoustic Wave Resonators

DU Bo^{1,2}, MA Jinyi², JIANG Xin^{1,2}, JIANG Hongming², XU Yang², TIAN Benlang², JIN Chengfei², SI Meiju²

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

Abstract: In order to suppress the lateral mode resonance of the film bulk acoustic wave resonator(FBAR), the 2D and 3D finite element models of FBARs were established in this work. The vibration displacement distributions at the central frequency and the frequency response curves of resonators with different resonator electrode structures were analyzed by frequency response simulation. The effects of different electrode structures on the parasitic vibration of the resonators were evaluated. And the lateral mode resonances were suppressed by optimizing the structure of resonator electrode. Based on the simulation results, a film bulk acoustic wave resonator with operating frequency of 1.873 GHz, insertion loss of 0.7 dB was designed and manufactured. The FBAR had no evident spurious resonance and the proposed design was verified.

Key words: film bulk acoustic resonator; FEM; parasitic vibration; frequency response

0 引言

相对于声表面波滤波器、LC 滤波器、介质滤波器等滤波器,薄膜体声波滤波器除具有工作频率高,体积小,可承受功率高等优点外,其制作工艺还可与 CMOS 工艺兼容^[1]。目前,FBAR 滤波器已被广泛 应用于移动通信市场^[2]。

薄膜体声波滤波器是由多个薄膜体声波谐振器 (FBAR)按一定电路结构构成,因此,高性能的薄膜 体声波滤波器依赖于高品质因数(Q)值、低杂波的 FBAR^[3-4]。

FBAR 是一种基于体声波理论,利用声学谐振

实现电学选频的器件,通过电极间的压电薄膜 (AlN、ZnO等)在垂直方向上的谐振进行选频,实现 高Q值、小体积谐振器^[5-6]。

目前,FBAR常采用一维等效电路仿真模型,如 梅森(Mason)模型或修正的巴特沃斯-范·戴克模 型(MBVD)进行仿真设计^[7-8]。但该方法不能对谐 振器的振动模式进行仿真分析,因此无法用于谐振 器的电极结构设计。本文采用 COMSOL 软件,分 别建立了 FBAR 的二、三维有限元模型,仿真分析 了电极形状对 FBAR 寄生振动的影响。最后,通过 制作和测试空气隙结构 FBAR,对设计进行了验证。

收稿日期:2016-05-19

作者简介:杜波(1985-),男,四川省南部县人,工程师,博士生,主要从事声表面波/体声波器件的研究。E-mail: duboyoulong@163.com。

1 FBAR 有限元建模

1.1 有限元模型

有限元方法是以变分原理和剖分插值为基础, 对实际模型进行离散化、构造插值函数,近似认为实 际点的行为由相邻节点行为的插值关系来描述,把 实际的物理问题离散化成求解节点未知量的代数方 程组来求解^[9]。

目前,FBAR的有限元分析主要是基于有限元 分析软件进行的,主要包括COMSOL、ANSYS等, 它们的计算内核都是基于相似的有限元理论。 FBAR的有限元分析主要涉及压电耦合分析,在处 理过程中,有限元软件所依赖的有限元方程为

$$\begin{bmatrix} \boldsymbol{M} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \{\boldsymbol{u} \} \\ \{\boldsymbol{\ddot{V}} \} \end{pmatrix} + \begin{bmatrix} \boldsymbol{C} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \{\boldsymbol{\dot{u}} \} \\ \{\boldsymbol{\dot{V}} \} \end{pmatrix} + \begin{bmatrix} \boldsymbol{K} & \boldsymbol{K}^z \\ \boldsymbol{K}^{z^{\mathrm{T}}} & \boldsymbol{K}^{\mathrm{d}} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \{\boldsymbol{u} \} \\ \{\boldsymbol{V}\} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \{\boldsymbol{F} \} \\ \{\boldsymbol{Q}\} \end{pmatrix}$$
(1)

式中: M, C, K, K^{*}, K^{d} 为系统的质量矩阵、阻尼矩阵、刚度矩阵、压电耦合分量和介电矩阵分量; $\{u\}$ 为结构位移向量; $\{V\}$ 为压电体节点电位向量; $\{F\}$ 为载荷力向量; $\{Q\}$ 为自由电荷电量,它们的不同特征决定了不同分析类型。在结构参数(包括几何参数和材料参数)给定及有限元网格生成后, M, C, K, K^{*} 和 K^{d} 已完全唯一确定了。

1.2 FBAR 二维有限元建模仿真

采用二维有限元模型可快速计算正方形电极 FBAR的振动模态和频率响应,实现FBAR的几何 参数优化设计。

FBAR 的基本结构如图 1 所示。因衬底对空气 隙结构 FBAR 振动性能影响较小,为减少运算量, 仅对压电复合薄膜结构层进行有限元仿真,各膜层 由下向上依次为 SiO₂、Mo、AlN、Mo、AlN。



图 1 FBAR 结构示意图

本文利用 COMSOL 软件建立了空气隙结构 FBAR 二维有限元(FEM)模型,如图 2 所示。在厚 度方向上,SiO₂、Mo、AlN、Mo、AlN 各膜层的单元 数分别为 1、2、5、2 和 2,整个滤波器网格剖分域单 元数量为 960。谐振器的顶电极为电压输入端口, 电压为 1 V,底电极电学边界设置为接地。在 FBAR 实际结构中,两边的边界延伸距离很大,为减小计算 量,在结构分析中将顶电极下各膜层超出顶电极的 部分设置为完美匹配层(PML)材料,且左、右两边 设置为固定的力学边界条件,以达到与实际情况较 吻合的效果。



图 2 FBAR 二维 FEM 模型及网格

完成频率响应分析后,将电极表面节点电荷值 积分,得到表面总电荷后,再利用

$$Y = \frac{\frac{\partial Q}{\partial t}}{V} = j\omega \frac{Q}{V}$$
(2)

便可求得 FBAR 导纳值。

式中:V 为电压;t 为时间;ω 为角频率。在电极端 口,可得到导纳 Y₁₁,然后利用 Y₁₁与 S₂₁的变换公式 可计算出谐振器 S₂₁曲线,如图 3 所示。



图 3 FBAR 二维模型 S21 频率响应曲线

通过优化各膜层膜厚和电极面积,本文设计了 中心频率为 1.85 GHz 的 FBAR。SiO₂ 厚为 0.1 μ m,底电极和顶电极 Mo 厚均为 0.33 μ m,压电 薄膜 AlN 厚为 1 μ m,保护层 AlN 厚为 0.3 μ m,顶 电极边长为 120 μ m。S₂₁计算结果如图 3 所示。由 图 3 可见,在谐振频率以上,存在较强的寄生谐振 峰,这些寄生谐振峰由侧向声波模式形成。

1.3 FBAR 三维有限元建模仿真

为削弱谐振器的寄生振动,必须对电极结构进

行优化设计,建立三维 FEM 模型进行仿真。在网格划分过程中,厚度方向上压电薄膜需要分成至少3份,以得到准确的仿真结果。

采用由二维 FEM 仿真得到的几何参数和相似的边界条件,建立了正方形电极、不规则四边形和不规则五边形的三维 FEM 模型,并进行了频率响应分析。

图 4 为正方形电极、变迹四边形电极、变迹五边 形电极 FBAR 的三维 FEM 仿真结果,反映了 FBAR 在中心频率处的振动位移分布情况。



图 4 FBAR 谐振器三维 FEM 振动位移仿真结果

由图 4 可知,正方形电极 FBAR 谐振器在振动 中心处的波动比另两种谐振器更大,表明正方形电 极的侧向声波模式比变迹电极更强;在顶电极边缘, 正方形电极 FBAR 的振动位移基本与边界垂直,而 另两种形状的谐振器在顶电极边界处的位移则呈现 杂乱无章的分布,表明变迹电极可以极大地增加侧 向声波模式的反射路径长度,达到削弱寄生峰值的 目的。

图 5 为 3 种电极 FBAR 的频率响应仿真曲线 对比。由图可知,3 种电极结构在谐振频率以下均 无明显寄生谐振峰。在谐振频率以上,正方形电极 存在较强的寄生谐振,而变迹四边形和五边形的寄 生谐振峰得到有效抑制。



2 FBAR 谐振器制作

通过有限元仿真,本文对 FBAR 进行了优化设 计,并完成了器件的制作,如图 6 所示。图 7 为探针 测试曲线,该器件的中心频率为 1.873 GHz,插入损 耗为 0.7 dB。由图 7 可见,谐振器 S₂₁曲线平滑,无 明显的寄生振动。



3 结束语

针对一维等效电路模型不能对 FBAR 电极结构进行优化设计的缺点,本文采用有限元法,利用 COMSOL 软件建立了 FBAR 的二、三维的 FEM 模型,仿真分析了不同电极结构对谐振器寄生振动的抑制作用,完成了谐振器的优化设计。通过 FBAR 实测曲线对设计进行了验证。仿真和实测结果表 明,结合二维 FEM 仿真快速,三维 FEM 仿真准确 的优点,采用有限元仿真法可以完成 FBAR 几何参 数设计和结构参数设计工作,同时,采用不规则电极 结构有助于削弱谐振器寄生振动,改善谐振器性能。

通过对比仿真结果和实验结果,器件的谐振特 性与仿真吻合,寄生振动得到有效抑制。但器件的 工作频率与仿真结果存在一定出入,这是由于器件 实际膜厚与设计值存在少许差异;器件的插入损耗 和反谐振峰值比仿真结果较差,原因是仿真模型中 省略了材料的声学及电学损耗。后续通过实测曲线 与实测曲线的拟合,提取损耗参数,可进一步提高仿 真精度。

参考文献:

- [1] 江洪敏,马晋毅,汤劲松,等.2.8 GHz 薄膜体声波谐振器的研究[J]. 压电与声光,2010,32(1):1-2.
 JIANG Hongmin, MA Jinyi, TANG Jinsong, et al.
 Study on 2.8 GHz thin film bulk acoustic resonator
 [J]. Piezoelectrics & Acoustooptics,2010,32(1):1-2.
- [2] ZOU Q, BI F, TSUZUKI G, et al. Temperature-Compensated FBAR Duplexer for Band 13[J]. IEEE International Ultrasonics Symposium, 2013, 47 (1): 236-238.
- [3] PARK H S, LEE J, SHIN J, et al. Newly developed high Q FBAR with Mesa-Shaped Membrane [C]//S.
 l. :European Microwave Conference, 2006:1281-1283.

- [4] FELD D A, PARKER R, RUBY R, et al. After 60 years: a new formula for computing quality factor is warranted[C]// San Jose, CA, USA: IEEE International Ultrasonics Symposium Proceedings, 2008: 431-436.
- [5] SU Qingxin, KIRBY P, KOMURO E, et al. Thin-film bulk acoustic resonators and filters using ZnO and Lead-Zirconium-Titanate thin films[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2001, 49 (4):769-778.
- [6] HARA M, YOKOYAMA T, UEDA M, et al. X-Band filters utilizing AlN thin film bulk acoustic resonators [C]//New York: IEEE Ultrasonics Symposium, 2007: 1152-1155.
- [7] 杜波,刘善群,马晋毅,等. 微声薄膜耦合谐振滤波器的 仿真与设计[J]. 压电与声光,2012,34(6):811-813.
 DU Bo, LIU Shanqun, MA Jinyi, et al. Simulation and design of film bulk acoustic wave coupling resonator filters[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2012,34 (6):811-813.
- [8] SHIN J S, PARK Y K, KIM Y I, et al. 1-chip balanced FBAR filter for wireless hansets [C]//S. l. : Proceedings of the 40th European Microwave conference, 2010: 1257-1260.
- [9] 莫喜平.新型弯张换能器的研究与设计[D].哈尔滨: 哈尔滨工程大学,1998.

读者信息反馈卡(2016 年第 4 期)

▲您目前	「最感兴趣的技	术问题:				
▲您认为	1本期最佳文章	:	理由:			
▲您认为本期欠佳文章:			∃:			
▲您希望	是本刊增加哪些	内容:				
读者姓名	i :	_通信地址:			_邮码:	
						复印有效
		《压电与声:	光》免费索阅卡			
姓名:	职务:	职称:	单位:			
地址:			邮编:	电话:		
企业产品:						
素阅期号:	年	月(每次仅限壹期)				
						复印有效