

微声薄膜耦合谐振滤波器有限元建模与仿真

杜波, 马晋毅, 江洪敏, 杨靖, 徐阳

(中国电子科技集团公司第26研究所, 重庆 400060)

摘要:针对一维等效电路仿真模型不能对滤波器振动模式进行仿真的局限性, 建立了微声薄膜耦合谐振滤波器二维和三维的有限元模型, 仿真分析了滤波器在对称谐振频率和反对称谐振频率下的振动模式, 并通过频率响应分析得到了滤波器的S参数。仿真结果表明, 采用有限元分析法可实现微声薄膜耦合谐振滤波器几何参数以及电极结构的优化设计。

关键词:微声薄膜; 耦合谐振滤波器; 有限元

中图分类号: TN65

文献标识码: A

Finite Element Modeling and Simulations of Film Bulk Acoustic Wave Coupling Resonator Filters

DU Bo, MA Jinyi, JIANG Hongming, YANG Jing, XU Yang

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

Abstract: 1D equivalent circuit model can't be used to simulate the vibration modes of filter. So, 2D and 3D FEM models of filters were built. Then, the vibration modes at symmetry and dissymmetry frequencies were analyzed. In the end, the S parameters of filter were computed by frequency response analysis. The results show that FEM can be used to design the geometry parameters and electrode structure of CRF.

Key words: film bulk acoustic wave; coupling resonator filter; finite element method

0 引言

微声薄膜滤波器(又名薄膜体声波滤波器)具有工作频率高(可到20 GHz), 体积小(芯片面积小于1 mm×1 mm), 可承受功率高(可大于3 W), 插入损耗小(1~2 dB)和适宜大规模生产的优点, 另外, 其制作工艺与CMOS工艺兼容, 可实现射频前端的单片集成^[1]。

受到梯形结构微声薄膜滤波器工作原理的限制, 它的发展遇到了两大瓶颈:

1) 尺寸难以进一步减小。

2) 只能实现单端-单端和平衡-平衡结构, 无法直接应用于单端-平衡电路中。这限制了微声薄膜滤波器在GSM或WCDMA中的应用。

微声薄膜耦合谐振滤波器(CRF)是从微声薄膜滤波器技术中衍变出的一种新型滤波器结构, 与传统的梯形结构微声薄膜滤波器相比, 芯片面积减小了至少2倍。同时, 除单端-单端和平衡-平衡结构

外, 它还可实现单端-平衡结构。因此, 近年来CRF成为射频前端滤波器的研究热点^[2]。

目前, CRF常采用一维等效电路仿真模型, 如对Mason模型或MBVD模型进行仿真设计^[3]。但该方法无法对滤波器的振动模式进行仿真分析, 因此无法用于CRF电极结构设计。本文采用COMSOL软件, 分别建立了二、三维的CRF有限元模型, 仿真分析了滤波器在对称谐振频率和反对称谐振频率下的振动模式, 并通过频率响应分析得到了滤波器的S参数, 为滤波器的电极设计提供了解决途径。

1 CRF介绍

CRF由两个微声薄膜谐振器和谐振器之间的去耦层在垂直方向上堆叠而成, 结构示意图如图1所示。微声薄膜谐振器的主体结构由上电极、氮化铝压电层和下电极组成, 常采用钼作为电极材料。去耦层的作用是提供声学耦合, 可通过两种方法实

收稿日期: 2012-06-01

作者简介: 杜波(1985-), 男, 四川南充人, 硕士, 主要从事声表面波器件与体声波器件的研究。

现:

1) 选用声阻抗差异大的材料形成布喇格反射层。

2) 采用一层声阻抗足够小的材料。

本文在仿真过程中选用了 SiO_2 -W- SiO_2 组成的布喇格反射层作为去耦层^[8]。空气腔的作用是提供声学隔离,防止声信号泄露。

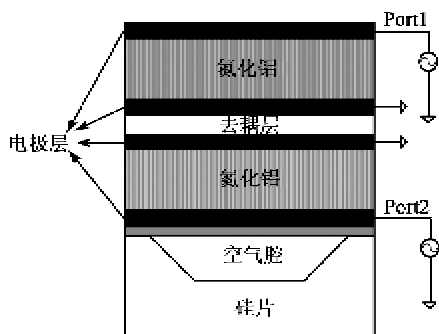


图1 CRF结构示意图

当电信号从输入谐振器进入后,在逆压电效应的作用下转变为声学信号,并通过去耦层传输到输出谐振器。在输出谐振器,由压电效应将声信号转变为电信号输出。

滤波器的工作频率由谐振器频率和去耦层厚度共同决定。调整去耦层薄膜层数和厚度可对滤波器通带宽度、通带波动和插入损耗等指标进行优化。去耦层薄膜层数越多、厚度越厚,谐振器之间的耦合就越弱,对应着滤波器带宽减小,通带波动减小。谐振器面积的变化会改变CRF的静电容,从而会影响其匹配特性,通过合理调节面积,可改善CRF的通带,减小通带波动和驻波。

2 有限元建模仿真

2.1 有限元模型

有限元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,近视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问题^[4]。

目前微声薄膜滤波器的有限元分析主要是基于有限元分析软件进行,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。微声薄膜滤波器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:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{M} & [0] \\ [0] & [0] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{\mathbf{u}} \\ \ddot{\mathbf{V}} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{C} & [0] \\ [0] & [0] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{\mathbf{u}} \\ \dot{\mathbf{V}} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} [\mathbf{K}] & [\mathbf{K}^Z] \\ [\mathbf{K}^Z]^T & [\mathbf{K}^d] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{u} \\ \mathbf{V} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \mathbf{F} \\ \mathbf{Q} \end{Bmatrix} \quad (1)$$

式中: $\mathbf{M}$ 、 $\mathbf{C}$ 、 $\mathbf{K}$ 、 $\mathbf{K}^Z$ 和 $\mathbf{K}^d$ 分别为系统的质量矩阵、阻尼矩阵、刚度矩阵、压电耦合分量和介电矩阵分量; $\mathbf{u}$ 为结构位移向量; $\mathbf{V}$ 为压电体节点电位向量。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, $\mathbf{M}$ 、 $\mathbf{C}$ 、 $\mathbf{K}$ 、 $\mathbf{K}^Z$ 和 $\mathbf{K}^d$ 已完全唯一确定了。 $\mathbf{F}$ 为载荷力向量; $\mathbf{Q}$ 为自由电荷电量,它们的不同特征决定了不同分析类型。

2.2 CRF 二维有限元建模仿真

二维模型可快速计算正方形电极 CRF 的振动模态和频率响应,可用于对 CRF 的几何参数进行优化设计。根据 CRF 的特点,本文利用 COMSOL 软件建立了二维 FEM 模型,如图 2 所示。各膜层由下向上依次为下谐振器:Mo、AlN、Mo;去耦层: SiO_2 、W、 SiO_2 ;上谐振器:Mo、AlN、Mo。

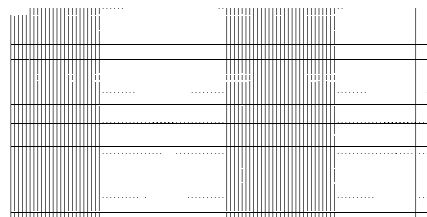


图2 CRF 二维 FEM 模型及网格

在厚度方向上,Mo、AlN、 SiO_2 和 W 的网格数分别为 1、4、2 和 1,整个滤波器网格剖分数量为 1 520。上谐振器的顶电极电压为电压输入端口,电压为 1 V,其他电极电学边界设置为接地。在 CRF 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 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。

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,再利用下式便可求得 CRF 导纳值,即

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

在输入电极端口处,可得到 Y_{11} 导纳,在输出端口,可得到 Y_{21} 导纳。

通过优化各膜层膜厚和电极面积,本文设计了中心频率 2.625 GHz 的 CRF。其中,2 个微声薄膜谐振器的电极 Mo 厚为 0.15 μm ,压电薄膜 AlN 厚

为 $1.263 \mu\text{m}$, 去耦层 SiO_2 厚为 $0.5 \mu\text{m}$, W 厚为 $0.4 \mu\text{m}$, 顶电极边长为 $127.4 \mu\text{m}$ 。导纳计算结果如图 3 所示。

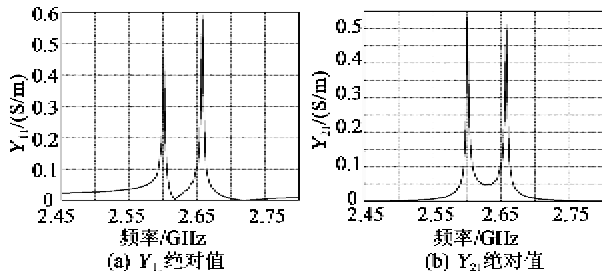


图 3 CRF 二维模型导纳频率响应曲线

由图 3 可看出, CRF 存在 2 个谐振频率, 它们的振动位移形貌如图 4、5 所示。其中, 图 4 的振动频率为 2.6005 GHz , 上、下 2 个谐振器呈对称振动模式, 图 5 的振动频率为 2.6565 GHz , 上、下 2 个谐振器呈反对称的振动模式。由图可见, 在模型表面存在很多波动, 这是由于除了纵向振动模式外, 还伴随着横向寄生振动模式。

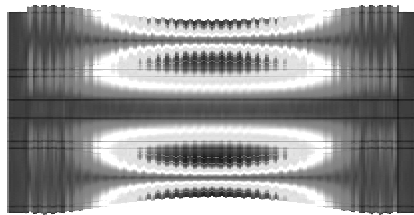


图 4 正方形电极 CRF 二维模型对称振动模式

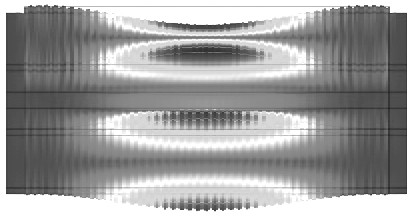


图 5 正方形电极 CRF 二维模型反对称振动模式

2.2 CRF 三维有限元建模仿真

二维仿真的局限是不能对电极形状及拓扑结构进行设计, 因此必须建立三维 FEM 模型进行仿真。为了得到准确的仿真结果, 在网格划分过程中, 厚度方向上压电薄膜需分成至少 3 份。对于对称的电极形状, 可采用对称边界条件, 简化 CRF 模型, 在保证足够精度的同时提高运算速度。

根据二维 FEM 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, 建立正方形电极 CRF 三维 FEM 模型, 并进行了频率响应分析。

图 6、7 分别为正方形电极 CRF 三维模型在对称谐振频率和反对称谐振频率处的振动位移图。同二维分析的结果一样, 在 CRF 中心处的振动位移最大, 向两边迅速衰减, 且在顶电极外的位移约等于 0。这表明谐振器的振动区域由上、下电极的重叠面积确定。振动位移箭头方向并不完全垂直于电极表面, 表明此时存在幅度较大的横向寄生振动。

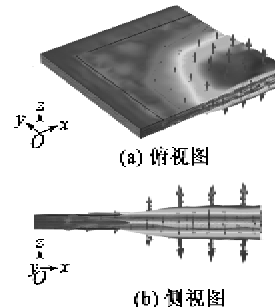


图 6 正方形电极 CRF 三维模型对称振动模式

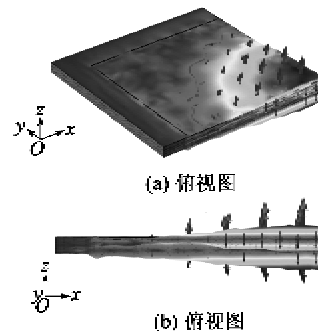
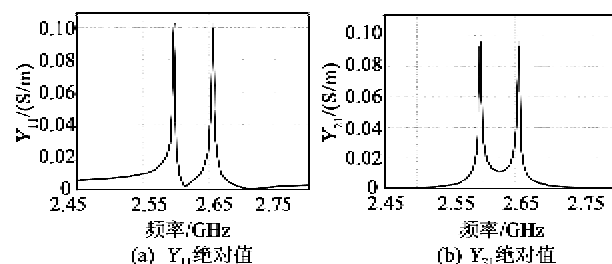


图 7 正方形电极 CRF 三维模型反对称振动模式

为了削弱横向寄生振动模式, 可采用与微声薄膜谐振器类似的设计方法, 对 CRF 不规则电极(任意两边不平行, 任意两角不等)和电极边界结构进行优化设计。此时, 由于几何结构的非对称性, 不能采用对称边界条件, 计算量将增加。

在得到 Y 参数矩阵后, 利用 Y 参数与 S 参数的变换公式, 可计算出滤波器 S 参数曲线, 如图 8 所示。在 S_{21} 曲线中, 两个谐振频率处有两个毛刺, 这是由于该处的导纳值变化较大, 计算步距不够小引入的计算误差。



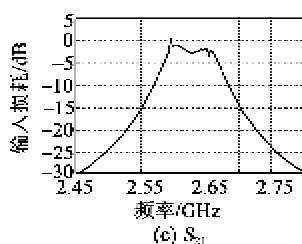


图8 CRF 三维模型频率响应曲线

3 结束语

针对一维等效电路模型不能对 CRF 振动状态进行分析的缺点,本文采用有限元法,利用 COMSOL 软件建立了 CRF 二、三维的 FEM 模型,仿真分析了滤波器对称振动和反对称振动的 2 个振动模式,并通过频率响应分析,计算出了滤波器的 Y 参数和 S 参数。仿真结果表明,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,可完成 CRF 几何参数设计和结构参数设计工作。

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] SMALI M K, JAMNEALA T, CALLAGHAN L A, et al. A de-coupled stacked bulk acoustic resonator (DS-BAR) filter with 2 dB bandwidth $> 4\%$ [C]//S. I.: IEEE Ultrasonics Symposium, 2007:604-607.
- [3] WU Tsungying, WANG Horngjou, SHING T K, et al. Single-to-balanced BAW filter combining CRF with lattice filter [C]//S. I.: IEEE Ultrasonics Symposium, 2005:2190-2193.
- [4] 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.
- [5] 王敏, 王海涛, 程继隆, 等. 超声相控阵声束控制特性分析[J]. 无损检测, 2009, 31(11):859-861.
WAN Min, WANG Haitao, CHENG Jilong et al. The analysis on the features of the propagating waves control of the ultrasonic phased array [J]. Nondestructive Testing, 2009, 31(11):859-861.
- [6] 刘鹏华, 戴明远. 医用线列阵声场计算方法[J]. 声学技术, 2004, 23(3):163-167.
LIU Penghua, DAI Mingyuan. Methods for calculating acoustic fields of medical linear array [J]. Technical Acoustics, 2004, 23(3):163-167.
- [7] 王波, 万明习, 王素品, 等. 医用超声阵列换能器波束容差分析与变迹处理 [J]. 西安交通大学学报, 1999, 33(3):5-9.
WANG Bo, WAN Mingxi, WANG Supin etc. Tolerance analysis and apodization processing of medical ultrasound array transducer wave beams [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 1999, 33(3):5-9.
- [8] 王勇, 李全禄, 吴晶, 等. 柱面声透镜声场分析[J]. 压电声光, 2011, 33(5):695-698.
WANG Yong, LI Quanlu, WU Jing, et al. The acoustic field of a cylindrical acoustic lens [J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2011, 33(5):695-698.
- [9] 夏荣民, 寿文德, 孙俊霞, 等. 自聚焦换能器的声场研究[J]. 应用声学, 2001, 20(5):16-20.
XIA Rongmin, SHOU Wende, SHUN Junxia, et al. The ultrasound field of a self-focusing transducer [J]. Applied Acoustics, 2001, 20(5):16-20.
- [10] 况迎辉. 超声相控阵探头的模型研究与参数优化[J]. 传感技术学报, 2010, 23(12):1731-1735.
KUANG Yinghui. Research on modeling and parameter optimization of ultrasonic phased array [J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2010, 23(12):1731-1735.

(上接第 671 页)