

文章编号: 1672-2892(2010)06-0712-05

一种射频体声波滤波器的版图设计与仿真

顾立, 钟毅

(武汉理工大学 信息工程学院, 湖北 武汉 430070)

摘要: 射频体声波滤波器品质因子高, 尺寸小, 其性能已超过声表面波滤波器, 将其替代传统的射频滤波器极具性能和价格优势。本文建立了适用于体声波滤波器性能分析的巴特沃斯—范戴克(MBVD)模型, 采用梯形级联方式设计了一种射频体声波滤波器的版图。在此基础上以中心频率为 1.99 GHz, 带宽 56 MHz 的体声波滤波器为例, 对不同连接级数梯形滤波器的插入损耗、阻带抑制进行了仿真与分析讨论, 在 4 阶滤波器中其带外衰减达到了 -29.708 dB。采用微机电机械系统工艺制备的 2 阶和 3 阶滤波器传输特性的测试曲线与仿真结果基本吻合, 表明射频体声波滤波器具有广泛的应用前景。该模拟结果可作为射频体声波滤波器设计的一个重要参考。

关键词: 体声波滤波器; 梯形滤波器; 通信系统; 频率特性

中图分类号: TN713

文献标识码: A

Layout design and simulation of a radio frequency bulk acoustic wave filter

GU Li, ZHONG Yi

(School of Information Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan Hubei 430070, China)

Abstract: Bulk acoustic wave filter fabricated by Complementary Metal Oxide Semiconductor(CMOS) is of high-quality factor and small size, which is better than Surface Acoustic Wave(SAW) Bulk acoustic wave filters. It has been used to take the place of conventional Radio Frequency(RF) filters for its outstanding performance and price advantage. The Modified Butterworth-Van Dyke(MBVD) model was built to analyze the frequency response of bulk acoustic wave filters. A kind of ladder RF bulk acoustic wave filter layout was designed. Based on the layout of the filter, the frequency characteristics of the varied ladder filters centering on 1.99 GHz with bandwidth 56 MHz were simulated by MBVD model and the out band attention of 4-order filter was about -29.708 dB. The tested transmission characteristics of 2-order and 3-order ladder filters fabricated by Micro Electro Mechanical Systems(MEMS) agreed well to the simulation results which indicated the broad application. The simulation results can provide a reference for designing the bulk acoustic wave filter.

Key words: bulk acoustic wave filter; ladder filter; communication system; frequency characteristics

随着无线通信技术,特别是第3代通信系统和蓝牙技术的快速发展,主通信频段日益拥挤,这就需要更多的通信信道满足不断增加的通信用户,而这些信道必须具有较小的带宽^[1]。同时伴随着通信系统的微型化发展,传统介质滤波器体积较大,不能与信号处理电路集成而成为其系统微型化发展的瓶颈;声表面波滤波器在芯片上占用面积不大,但在更高频率遇到了困难,特别是要采用亚微米级的光刻技术限制了其在新通信标准中应用^[2-3]。薄膜体声波滤波器可工作在 500 MHz~20 GHz 频段内,具有 Q 值高,尺寸小且加工工艺与 CMOS 工艺兼容等优点,为实现片上(on-chip)通信系统创造了有利条件,成为实现无线通信系统微型化的一个重要途径^[4-7]。完整的体声波滤波器是由若干不同频率薄膜体声波谐振器(Thin Film Resonator, TFR)组成。TFR 器件是一种制作在硅或砷化镓衬底上,由电极—压电薄膜—电极构成的三明治结构,其工作原理是基于压电薄膜厚度方向的纵向振动引起的谐振。Agilent 公司于 2001 年成功研制出基于 TFR 器件的双工滤波器,并于 2002 年将其批量生产,从而在世界范围内引发了对 TFR 研究的热潮^[8]。三星公司的 CDMA 手机中均采用了 TFR 器件,其 TFR 产品占据了 70% 以上的 CDMA 手机市场^[9]。目前 Avoga 公司推出的第 4 代个人通信服务(Personal Communications Service, PCS)

收稿日期: 2010-05-10; 修回日期: 2010-06-16

基金项目: 武汉理工大学自主创新研究基金资助项目(2010-II-013)

双工器发送信道的最大插入损耗仅为 2.7 dB，接收信道的插入损耗最高为 3.2 dB，同时达到了 +33 dBm 绝对最高发射功率的高功率规格^[10]。目前我国在 TFR 技术领域还处于理论研究和实验阶段。

1 体声波滤波器版图设计

TFR 器件的声学回路主要包括顶电极、压电层和底电极，见图 1。而单个 TFR 只是在某个频率点产生谐振，不能称之为滤波器。将多个 TFR 谐振器通过某种方式级联在一起就可构成满足一定需要的滤波器。由 TFR 连接成带通滤波器，一般采用梯形连接。典型的滤波器连接见图 2，当 TFR1 的串联谐振器频率(f_{s1})等于 TFR2 的并联谐振频率(f_{p2})时，就可获得带宽为($f_{p1}-f_{s2}$)的带通滤波器(f_s 为串联谐振频率， f_p 为并联谐振频率)^[11]。

对于 RF 微波滤波器的设计，由于对其要求是多方面的，设计的方法也不尽相同。本文主要研究 RF 无源带通滤波器的设计方法，对它的设计通常应考虑以下指标：1) 中心频率 f_0 ：由 TFR1 的串联谐振器频率 f_{s1} 或 TFR2 的并联谐振频率 f_{p2} 决定；2) 带宽(BW)：通常定义传输特性曲线 -3 dB 处对应的高截止频率点和低截止频率点之差；3) 插入损耗(Insertion Loss, IL)：定义为通频带内滤波器的输入功率与输出功率之比；4) 带内波动 ripple；5) 阻带衰减 A_s 。可见，对滤波器的要求是多方面的。通常要求其插入损耗、带内波动尽可能小，阻带衰减尽可能大。

在对 RF 微波滤波器性能进行仿真前先设计其版图，通过设计不同的上电极厚度实现 TFR1 的串联谐振器频率(f_{s1})等于 TFR2 的并联谐振频率(f_{p2})来控制滤波器的中心频率 f_0 。因此，在采用 MEMS 平面工艺制备梯形体声波滤波器时，上电极需要 2 个版图。设计时选择滤波器的中心频率 f_0 为 1.99 GHz，带宽为 60 MHz，带内插损 ≤ 2.7 dB，阻带损耗 ≥ 30 dB。采用 L-edit 软件设计了 2 串 1 并和 3 串 3 并的梯形体声波滤波器版图(见图 3)，单个 TFR 谐振区面积为 0.04 mm^2 ，上下电极 pad 尺寸为 $50 \mu\text{m} \times 50 \mu\text{m}$ 。

2 体声波滤波器仿真建模

对体声波器件的建模可基于不同层次。在物理层上，体声波可以采用一维 Mason 模型对 TFR 三明治结构中层堆的优化和材料参数的提取进行有益的模拟。在开发 TFR 器件时，这种模型有利于分析材料和结构因素对其谐振性能的影响。但对于体声波滤波器的设计和系统级仿真而言，Mason 模型显得过于复杂，工作正常的 TFR 可用更紧凑的 MBVD 模型模拟。图 4 中 MBVD 模型通过曲线拟合的方法从 TFR 器件测量的阻抗特性曲线或 S 参数曲线反标定模型中分立元件的值，是一种非常实用的方法，而且在谐振器正常工作的前提下，其结果与其他几种模型相比更接近实际。

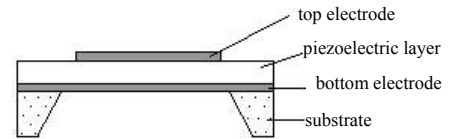


Fig.1 Schematic view of TFR
图 1 TFR 器件结构示意图

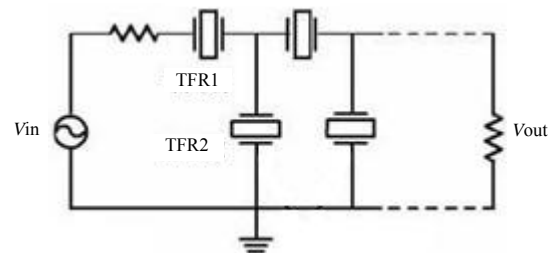


Fig.2 Topology structure of ladder-type filter based on TFRs
图 2 梯形体声波滤波器的连接图

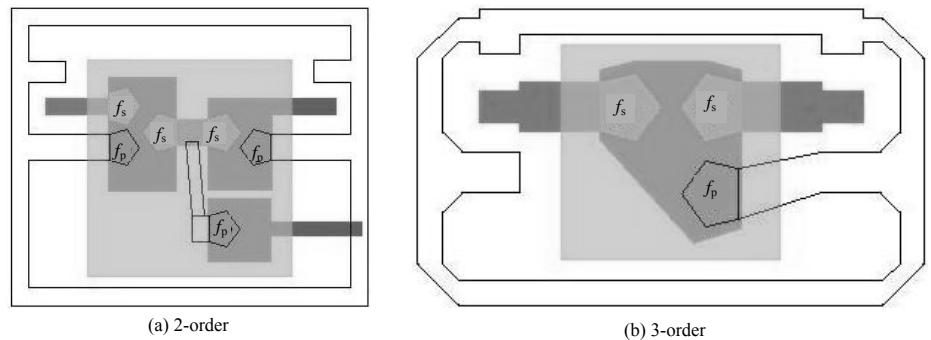


Fig.3 Layout of ladder-type bulk acoustic filter
图 3 设计的梯形体声波滤波器版图

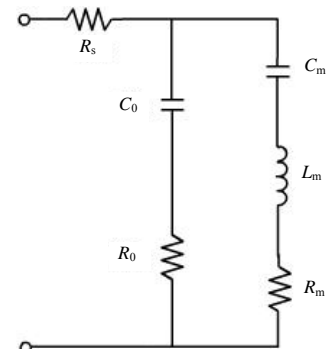


Fig.4 MBVD equivalent circuit of TFR
图 4 体声波谐振器的 MBVD 等效电路模型

图4中在分布参数条件下, MBVD模型中体声波谐振器的阻抗为:

$$Z = R_s + \frac{\left(R_0 + \frac{1}{j\omega C_0}\right) \times \left(R_m + j\omega L_m + \frac{1}{j\omega C_m}\right)}{\left(R_0 + \frac{1}{j\omega C_0}\right) + \left(R_m + j\omega L_m + \frac{1}{j\omega C_m}\right)} \quad (1)$$

式中: C_0 为谐振器的静态电容; C_m 和 L_m 分别表示机械相关的动态电容和动态电感; R_m 表示 TFR 的机械损耗; R_0 和 R_s 分别表示压电薄膜层的介电损耗以及上、下电极的引线损耗。MBVD 模型中的 6 个参数可由 TFR 的阻抗特性曲线或 S 参数曲线反标定出, 相关的关系式为:

$$r = \frac{C_0}{C_m} \quad (2)$$

$$\omega_s = \frac{1}{\sqrt{L_m C_m}} \quad (3)$$

$$\left(\frac{\omega_p}{\omega_s}\right)^2 = 1 + \frac{1}{r} \quad (4)$$

$$X_p = \frac{1}{\omega_p C_0} \quad (5)$$

$$\frac{1}{Q_s} = \omega_s R_m C_m \quad (6)$$

$$\frac{1}{Q_e} = \frac{\omega_p R_0 C_0}{r} \quad (7)$$

$$\frac{1}{Q_{s0}} = \frac{1}{Q_s} \left(1 + \frac{R_s}{R_m}\right) \quad (8)$$

$$\frac{1}{Q_{p0}} = \left(\frac{\omega_p}{\omega_s}\right) \left(\frac{1}{Q_s} + \frac{1}{Q_e}\right) \quad (9)$$

式中: ω_s 为 TFR 的串联谐振频率; ω_p 为 TFR 的并联谐振频率; Q_s 为串联谐振的品质因数; Q_p 为并联谐振的品质因数; r, X_p, Q_s 和 Q_p 为中间变量。

3 体声波滤波器的仿真

以设计的梯形滤波器版图为基础, 用 MBVD 模型仿真了不同连接级数滤波器的频率特性。由于串并联 TFR 具有不同上电极厚度, 因此在 MBVD 模型中仅 R_s 的值不同。模型中各参数根据文献[12]中单个 TFR 性能测试结果, 按照式(2)~式(9)提取 $R_{s1}=1.02 \Omega$, $R_{s2}=1.48 \Omega$, $C_0=1.80 \text{ pF}$, $R_0=0.85 \Omega$, $C_m=80.5 \text{ fF}$, $L_{m1}=79.5 \text{ nH}$, $L_{m2}=83.1 \text{ nH}$, $R_m=0.65 \Omega$, 利用 ADS 软件对体声波滤波器进行性能仿真。图5为串并联谐振器的阻抗-频率图, 图中 TFR1 的串联谐振器频率(f_{s1})等于 TFR2 的并联谐振频率(f_{p2}), 均为 1.990 GHz, 表明这 2 个谐振器的阻抗-频率满足体声波滤波器级联的必要条件。

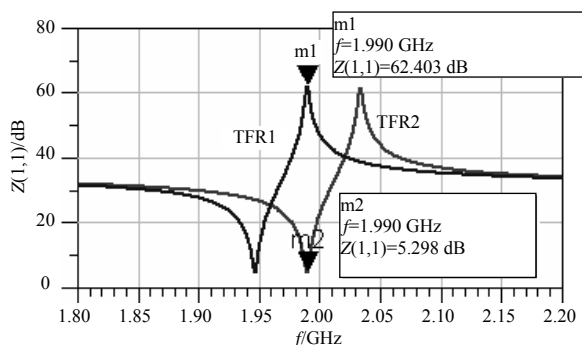


Fig.5 Electrical impedance and frequency of series and shunt TFRs
图5 串并联谐振器的阻抗-频率图

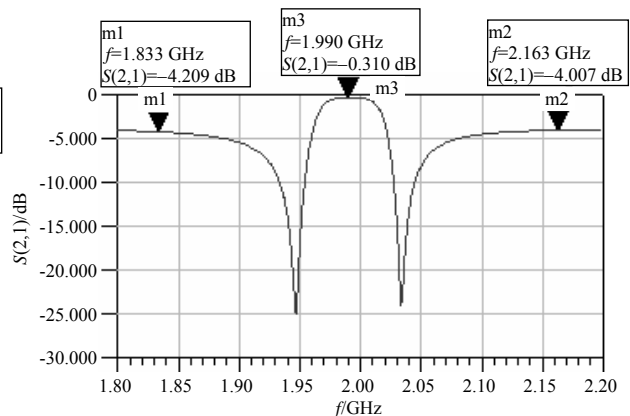


Fig.6 $S(2,1)$ of ladder-type bulk acoustic filter with one stage
图6 串 1 并梯形体声波滤波器的 $S(2,1)$ 参数仿真图

以具有图 5 所示谐振特性的 TFR 为单元,以图 3 所示设计的梯形滤波器版图为连接方式,采用 ADS 软件模拟了不同级数体声波滤波器的传输响应特性 S_{21} 曲线。图 6 为按照图 3(a)所示级联方式模拟的体声波滤波器的频率特性,由图可见 2 个 TFR 采用 1 串 1 并梯形级联方式连接后,其仿真结果就是一个典型带通滤波器的频率响应曲线。该滤波器通频带内的插入损耗仅为 -0.310 dB, 3 dB 带宽约为 58 MHz, 滚降陡峭。但其带外衰减非常小, 左边阻带为 -4.209 dB, 右边阻带为 -4.007 dB, 尚不能满足无线通信系统中对带外信号衰减的需求。解决这一问题的方法是增加谐振器的连接级数。

图 7 是增加 TFR 连接级数后得到的 2 串 2 并、3 串 3 并、4 串 4 并的体声波滤波器频率响应特性。从图中可以看到,随着梯形滤波器连接级数的增加,带外衰减急剧增加,在左边带从 -11.993 dB 到 -20.989 dB 到 -29.145 dB, 几乎每增加一对 TFR, 就要增加约为 8 dB 的衰减, 其右边带也有类似的规律; 但其通频带内的插入损耗也会慢慢增加, 在 4 串 4 并时为 -1.240 dB。在实际制作体声波滤波器时,随着 TFR 个数的增加, TFR 芯片的面积也会相应增加, 工艺的复杂度也会增大, 因此其生产成本就会相应地增大。在实际生产中往往都会对生产成本、带内插入损耗和带外衰减这些因素进行折衷考虑, 一般在需要大的带外衰减时, 才会增加 TFR 的级联个数^[13]。

4 体声波滤波器的实现

采用 MEMS 加工工艺,按照图 3 所设计的版图制备了 2 阶和 3 阶滤波器,并测试了其传输特性,图 8 为 2 个滤波器测试的 S_{21} 曲线。对比 2 个滤波器的传输特性发现 3 阶滤波器的带外衰减明显比 2 阶滤波器的带外衰减大,在左边带 3 阶滤波器的带外衰减达到 -11.695 dB, 而 2 阶滤波器为 -3.573 dB, 其右边带也具有相似的趋势。这一测试结果与仿真分析基本吻合,表明本文的仿真分析为实际设计基于 TFR 的 RF 微波滤波器提供了有力的理论依据和指导。实验制备的 2 阶和 3 阶滤波器带外衰减均比仿真分析结果小,这是由于体声波滤波器的实际电学性能与 MEMS 工艺参数、材料特性、串并联 TFR 谐振区尺寸等多个因素紧密相关,因此造成滤波器的带外衰减比仿真结果小。同时,滤波器的中心频率比仿真时的要高,以及通频带内带宽的增大,可能是由于实验过程中薄膜厚度无法控制得与仿真结果严格一致,导致串并联谐振频率不能精确相等造成的。

5 结论

基于 MEMS 技术的薄膜体声波 RF 滤波器具有体积小、性能优越、与 CMOS 工艺兼容等特点,成为第 3 代移动通信技术领域的研究热点。本文设计了梯形体声波滤波器版图,并采用 MBVD 模型对不同级数梯形体声波滤波器的传输特性进行了仿真。模拟和实验结果表明,随着 TFR 连接级数的增加,滤波器的插入损耗和带外抑制同时增加,实际生产中通常对带内插入损耗和带外衰减进行折衷考虑或采用增加外部匹配电路的方法进一步调节。

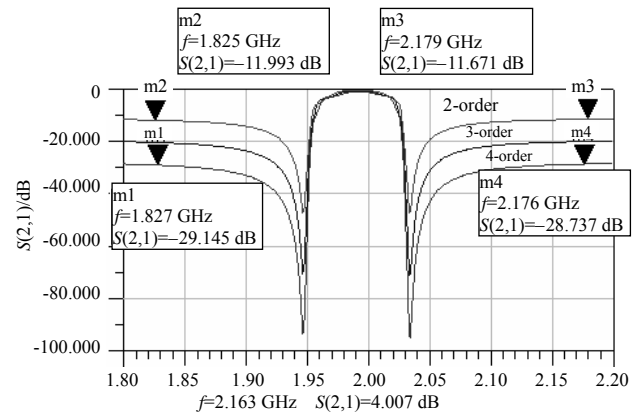


Fig.7 S_{21} of ladder-type bulk acoustic filters with different orders
图 7 不同级数梯形体声波滤波器的 S_{21} 参数仿真图

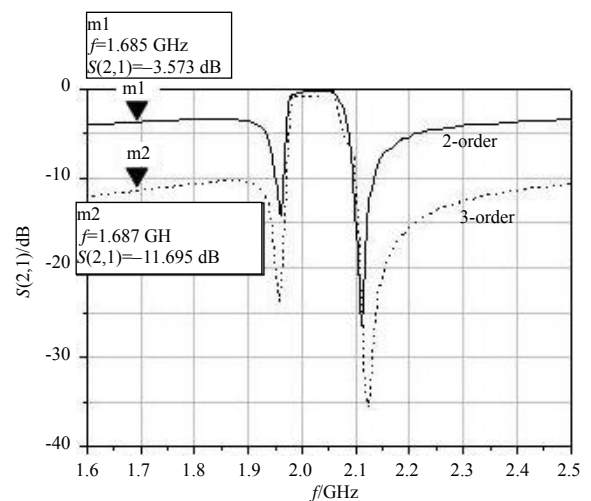


Fig.8 S_{21} of ladder-type bulk acoustic filters with different orders
图 8 不同级数梯形体声波滤波器的插入损耗 S_{21} 图