

高阻带抑制 FBAR 滤波器

唐小龙^{1,2}, 陈艳兵^{1,2}, 金中^{1,2}, 吴高米^{1,2}, 张必壮^{1,2}, 蒋平英^{1,2}

(1. 中电科芯片技术(集团)有限公司, 重庆 401332; 2. 国知创芯(重庆)科技有限公司, 重庆 401332)

摘要: 采用一维 Mason 模型, 研究了薄膜体声波谐振器(FBAR)压电层/电极膜厚比对有效机电耦合系数的影响。随着压电层膜厚占比的增加, 谐振器有效机电耦合系数逐渐增大, 通过膜厚优化和流片实现了高频 FBAR 谐振器的研制。在采用梯形电路结构的基础上, 研究了滤波器级数、串并联谐振器静态电容比、并联谐振器串联电感对滤波器阻带抑制的影响, 通过工艺流片, 制备了一款中心频率为 4.4 GHz、通带最低损耗为 2.3 dB、-1 dB 带宽为 112 MHz、通带两侧带外抑制优于 50 dBc 的 FBAR 滤波器芯片, 为高频高抑制 FBAR 滤波器的研制提供了参考。

关键词: 薄膜体声波谐振器(FBAR); 滤波器; 高阻带抑制; Mason 模型; 高频

中图分类号: TN65; TN713; TN75 **文献标识码:** A

FBAR Filter with High Stopband Suppression

TANG Xiaolong^{1,2}, CHEN Yanbing^{1,2}, JIN Zhong^{1,2}, WU Gaomi^{1,2},
ZHANG Bizhuang^{1,2}, JIANG Pingying^{1,2}

(1. CETC of Chips Technology Group Co., Ltd., Chongqing 401332, China;

2. NHCAS(Chongqing) Technology Co., Ltd., Chongqing 401332, China)

Abstract: A one-dimensional Mason model was used to study the effect of the piezoelectric layer and electrode thickness ratio on the effective electromechanical coupling coefficients of FBAR resonators. As the proportion of piezoelectric layer thickness increases, the effective electromechanical coupling coefficient of the resonator gradually increases. A high-frequency FBAR resonator was developed via film thickness optimization and chip fabrication. Based on adopting trapezoidal circuit structures, the effects of the stages of the filter, ratio of static capacitance in series and parallel resonators, and series inductance of parallel resonators on the suppression of filter stopband were studied. Through chip fabrication, an FBAR filter chip with a center frequency of 4.4 GHz, minimum passband loss of 2.3 dB, -1 dB bandwidth of 112 MHz, and near end out of band suppression of better than 50 dBc on both sides of the passband was prepared, thus providing a reference for the development of high-frequency and high-suppression FBAR filters.

Key words: FBAR; filter; high stopband suppression; Mason model; high frequency

0 引言

随着第五代移动通信、电子对抗以及相控阵雷达等通信系统的快速发展, 对滤波器提出了高频、高抑制等要求^[1-3]。国外的薄膜体声波谐振器(FBAR)滤波器技术比较成熟, 其商业化应用已有 20 余年。国内对 FBAR 滤波器的研究起步较晚, 主要集中在科研院所和高校。2019-2022 年, 李丽、李丰、李亮等^[4-5]先后分别研制出中心频率为 5.5 GHz、6 GHz 的 FBAR 滤波器, 带外抑制分别为 26.88 dBc、

32 dBc; 2022 年, 李亮等^[6]研制了中心频率为 1.268 MHz、近端带外抑制高于 50 dBc 的 FBAR 滤波器芯片。2022-2023 年, 刘娅、蒋世义等^[7-9]分别研制出中心频率为 6.09 GHz 和 5.8 GHz、带外抑制大于 40 dBc 的 FBAR 滤波器芯片, 以及中心频率为 5.43 GHz 的 FBAR 滤波器芯片。FBAR 滤波器在工作频率升高时, 寄生参数对带外抑制性能的影响显著, 国内尚未见有关高频高带外抑制 FBAR 滤波器实用化样品的研究报道。基于高抑制 FBAR

收稿日期: 2024-10-24

作者简介: 唐小龙(1986-), 男, 四川省广安市人, 高级工程师。

滤波器的设计,本文研制了一款中心频率为 4.4 GHz,通带最低损耗为 2.3 dB, -1 dB 带宽为 112 MHz,通带两侧带外抑制优于 50 dBc 的 FBAR 滤波器芯片,为高频高抑制 FBAR 滤波器的研制提供了参考。

1 高抑制 FBAR 滤波器设计

1.1 FBAR 谐振器的研制

FBAR 谐振器是组成 FBAR 滤波器的基本单元。典型的 FBAR 谐振器剖面结构如图 1 所示,主要由支撑层、下电极、压电层、上电极和保护层构成。谐振器有效区域上方为空气介质,有效区域下方通过牺牲层及释放工艺制备出空腔结构,确保将声波能量限制在谐振器有效区域内,提高谐振器的品质因数(Q)值。

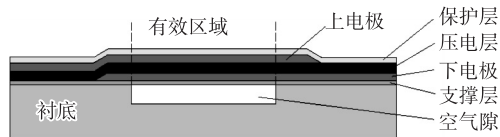


图1 FBAR 谐振器结构

Mason 模型是谐振器声学叠层结构的一维物理模型,通过声速、声阻抗、衰减因子、机电耦合系数、介电常数等材料参数,以及声学叠层中各膜层的厚度参数可计算得到谐振器的频率特性曲线,常被用来设计谐振器的声学叠层。本文采用一维 Mason 模型^[10],通过固定谐振器串联谐振频率 f_s ,实现了谐振器各膜层厚度的优化设计。图 2 为压电层膜厚与电极层膜厚之比(r)对谐振器阻抗的影响。由图可见,随着 r 不断增大,谐振器并联谐振频率逐渐升高。

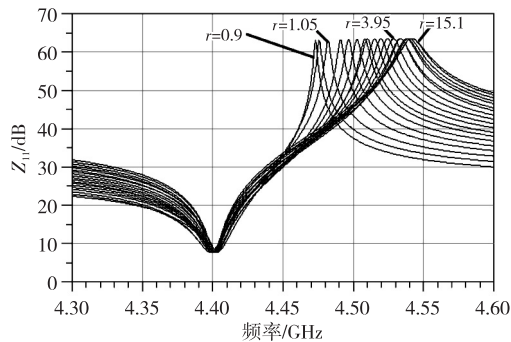


图2 压电层/电极膜厚比对谐振器阻抗的影响
谐振器有效机电耦合系数可计算^[11]为

$$k_{\text{eff}}^2 = (\pi/2) \cdot (f_s/f_p) / \tan[(\pi/2) \cdot (f_s/f_p)] \quad (1)$$

式中 f_s 、 f_p 分别是谐振器的串联谐振频率和并联

谐振频率。图 3 为 r 对有效机电耦合系数的影响。由图可见,随着 r 的增加,谐振器的有效机电耦合系数逐渐增大,当 r 增大到一定程度后,有效机电耦合系数趋于定值。

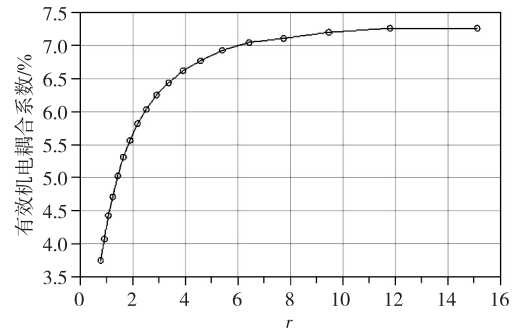


图3 压电层/电极膜厚比对有效机电耦合系数的影响

对于上、下电极材料为钼、压电层材料为氮化铝的 FBAR 谐振器,采用上述方法优化了叠层结构,绘制的特征阻抗为 50 Ω 的单端谐振器版图及其阻抗特性实测曲线如图 4 所示。当谐振器串联谐振频率 f_s 为 4.394 GHz,并联谐振频率 f_p 为 4.504 GHz 时,有效机电耦合系数为 5.88%。

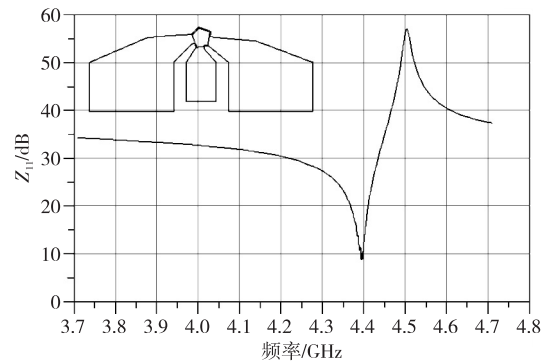


图4 谐振器版图与实测阻抗特性曲线

1.2 高抑制 FBAR 滤波器设计

FBAR 滤波器是由 FBAR 谐振器按照一定的电路结构组合而成。常用的 FBAR 滤波器电路结构分为梯形结构和桥式结构两种。前者由于具有陡峭抑制响应而被广泛应用。为设计出低损耗、高阻带抑制的 FBAR 滤波器,除了采用梯形电路结构外,还可从 3 个方面开展设计:一是增加滤波器的级数;二是优化串联臂和并联臂谐振器的静态电容比;三是增加并联臂串联接地电感。

图 5 为不同级数 FBAR 滤波器的频响特性对比。由图可见,滤波器级数越多,阻带抑制越大,但插入损耗会随之增加。

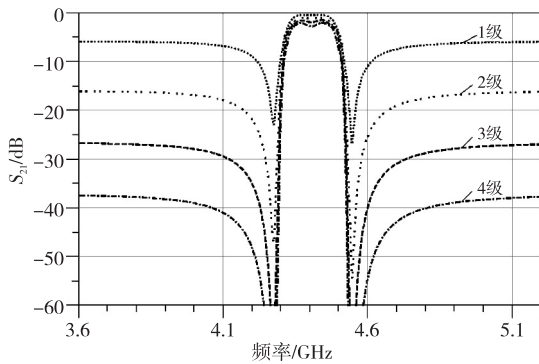


图5 不同级数FBAR滤波器的频响特性曲线

FBAR滤波器串联臂和并联臂谐振器的静态电容比对阻带抑制影响显著。图6为串联臂和并联臂谐振器不同静态电容比的频响特性曲线。由图可见,随着电容比的不断减小,滤波器阻带抑制不断增加,但滤波器通带形貌由于阻抗失配会出现一定程度的恶化。

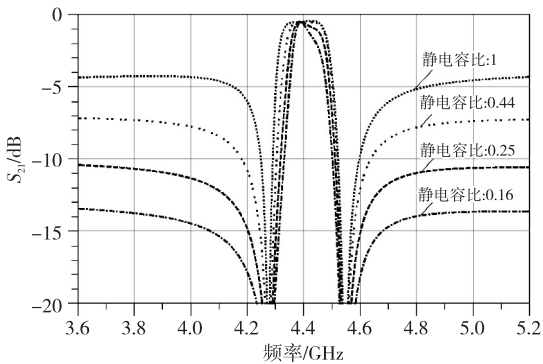


图6 不同静态电容比的频响特性曲线

此外,在并联臂谐振器上串联电感可在滤波器阻带内增加传输零点,进而提升阻带抑制水平。通过改变电感量的大小能够调谐传输零点的位置,实现高水平阻带抑制。

综合上述3个方面设计了4级FBAR滤波器如图7所示。其中S1-S4为串联谐振器,P1-P4为并联谐振器,L1-L4为并联谐振器支路上的串联电感。设计中为减小静电容比,串联谐振器S3相较于其他谐振器面积取值偏小,故在工艺制备过程中易出现塌陷。为避免该现象发生,对该谐振器进行分形设计,即采用2个面积为原谐振器2倍的S3-1和S3-2谐振器串联来替代。为提高设计准确性,在HFSS中建立测试电路板和滤波器芯片版图的电磁模型,然后将计算得到的电磁参数导入ADS,最后在ADS中协同谐振器Mason模型搭建滤波器电路,完成滤波器设计。为减轻芯片版图结构不合理

导致的滤波器阻带抑制恶化,对芯片版图结构进行了迭代优化,减小谐振器间不必要的电磁耦合。图8为优化后的滤波器频响曲线图。由图8可见,顶部损耗为2.41 dB,近端带外抑制优于50 dBc。

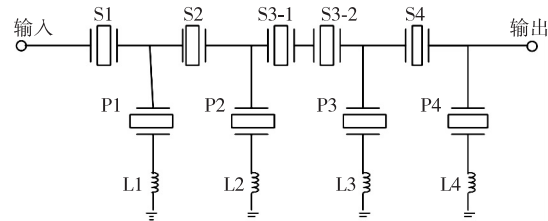


图7 谐振器版图与实测阻抗特性曲线

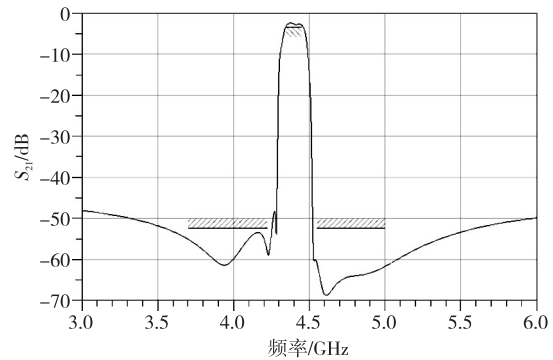


图8 高阻带抑制FBAR滤波器仿真频响曲线

2 FBAR滤波器制备

滤波器设计完成后,按照图9所示的工艺流程进行流片。衬底材料采用高阻硅,上、下电极材料为钼,压电层材料为氮化铝,采用磁控溅射方式制备。

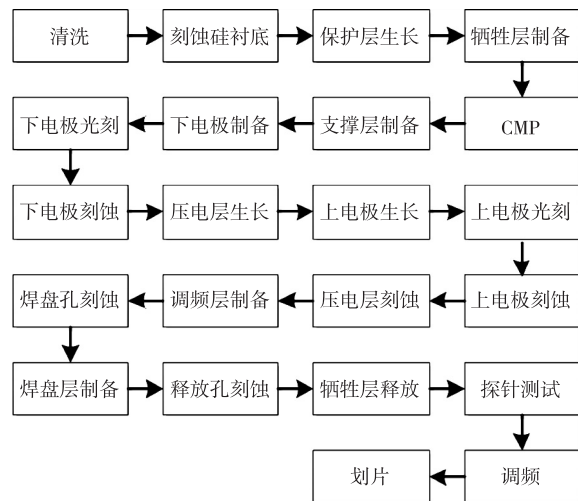


图9 FBAR滤波器制备工艺流程

3 测试结果与讨论

采用双端口矢量网络分析仪对FBAR滤波器进行测试,滤波器顶部损耗为2.3 dB,-1 dB带宽为112 MHz,在3 630~4 130 MHz和4 140~5 200 MHz

频段范围内的阻带抑制分别为 51.2 dBc 和 57 dBc。仿真与实测数据曲线如图 10、11 所示。由图可见,整体吻合较好。

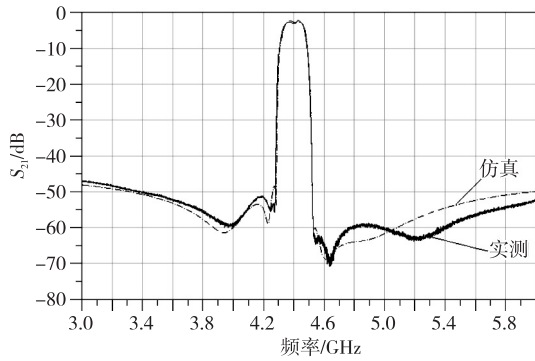


图 10 仿真与实测频响曲线

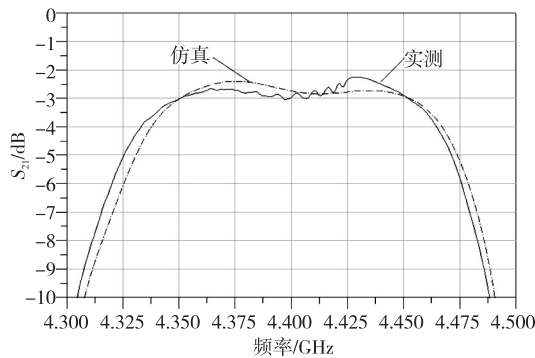


图 11 仿真与实测频响曲线

4 结束语

本文介绍了一种高频高阻带抑制的 FBAR 滤波器。通过 FBAR Mason 模型研究了谐振器压电层/电极膜厚比对有效机电耦合系数的影响,并通过膜厚优化和流片实现了高频 FBAR 谐振器的研制。通过对滤波器级数、串并联谐振器静电容比的优化,以及并联臂接地电感的引入和优化,设计了一款高阻带抑制 FBAR 滤波器。经测试及分析表明,其仿真结果与实测吻合较好。

参考文献:

[1] GUERRERO E, GIMENEZ A, HEEREN W, et al. BAW filter trends for 5G and beyond [C] // Cocoa Beach, FL, USA; 2024 IEEE International Microwave Filter Workshop (IMFW), 2024: 75-77.

[2] TAG A, SCHAEFER M, SADHU J, et al. Next generation of BAW: the new benchmark for RF acoustic technologies [C] // Venice, Italy; 2022 IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS), 2022: 1-4.

[3] DING Rui, XUAN Weipeng, GAO Feng, et al. Compact and high steep skirts hybrid heterogeneous inte-

grated N77 full band BAW filter based on band-stop theory [J]. IEEE Electron Device Letters, 2024, 45 (5): 793-796.

- [4] 李丽, 赵益良, 李宏军. 用于 C 波段的薄膜体声波谐振器滤波器 [J]. 半导体技术, 2019, 44(12): 951-955. LI Li, ZHAO Yiliang, LI Hongjun. A film bulk acoustic resonator filter for C band application [J]. Semiconductor Technology, 2019, 44(12): 951-955.
- [5] 李亮, 刘青林, 付越东, 等. 6 GHz 高频率 FBAR 滤波器 [J]. 半导体技术, 2022, 47(7): 549-553. LI Liang, LIU Qinglin, FU Yuedong, et al. 6 GHz high frequency FBAR filter [J]. Semiconductor Technology, 2022, 47(7): 549-553.
- [6] 李亮, 张仕强, 梁东升, 等. 高抑制或低插损型卫星导航 FBAR 芯片设计 [J]. 半导体技术, 2022, 47(6): 488-492. LI Liang, ZHANG Shiqiang, LIANG Dongsheng, et al. Designs of FBAR chips for satellite navigation with high rejection or low insertion loss [J]. Semiconductor Technology, 2022, 47(6): 488-492.
- [7] 刘娅, 孙科, 马晋毅, 等. C 波段 WLP 薄膜体声波滤波器的研制 [J]. 压电与声光, 2022, 44(2): 260-263. LIU Ya, SUN Ke, MA Jinyi, et al. Development of C band WLP packaged FBAR [J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2022, 44(2): 260-263.
- [8] 蒋世义, 蒋平英, 马晋毅, 等. C 波段宽带薄膜体声波滤波器设计及验证 [J]. 压电与声光, 2023, 45(4): 535-539. JIANG Shiyi, JIANG Pingying, MA Jinyi, et al. Design and verification of C band broadband thin-film bulk acoustic wave filter [J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2023, 45(4): 535-539.
- [9] 张必壮, 唐小龙, 蒋平英, 等. 薄膜体声波谐振器 Mason 模型参数的提取方法 [J]. 压电与声光, 2022, 44(2): 215-219. ZHANG Bizhuang, TANG Xiaolong, JIANG Pingying, et al. Extraction method of mason model parameters of thin film bulk acoustic resonator [J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2022, 44(2): 215-219.
- [10] 唐小龙, 刘娅, 蒋平英, 等. 一款 2.4 GHz WiFi 频段 FBAR 带通滤波器设计 [J]. 压电与声光, 2022, 44(2): 191-193. TANG Xiaolong, LIU Ya, JIANG Pingying, et al. Design of a 2.4 GHz WiFi band FBAR bandpass filter [J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2022, 44(2): 191-193.
- [11] HASHIMOTO K. RF Bulk acoustic wave filters for communications [M]. Norwood; Mass. Artech House, 2009.