

框架结构对薄膜体声波谐振器性能提升的研究

吴永乐¹, 吴昊鹏², 赖志国³, 蔡 洵³, 唐 滨³, 杨清华^{2,3}, 杨雨豪¹, 王卫民^{2*}

(1. 北京邮电大学集成电路学院, 北京 100876; 2. 北京邮电大学电子工程学院, 北京 100876;
3. 苏州汉天下电子有限公司, 江苏苏州 215000)

摘要: 本文研究了框架结构(Frame)对薄膜体声波谐振器(Film Bulk Acoustic Resonator, FBAR)提升性能的作用, 从两种Frame结构对体声波能量的反射匹配基础理论出发, 针对其功能特点, 以实验的方式确定了低频和高温多组框架微结构的组合, 对多组FBAR进行了版图绘制以及光刻流片, 最终通过片上测试得到了所有分组的谐振器性能. 对测试得到的性能进行了分组统计筛选, 从测试结果来看, 经过优选之后的Frame结构分组无论是低频还是高频FBAR谐振器都具有提升性能的作用. 对低频(1.7 GHz附近)FBAR来说, 并联谐振品质因数可以提升1 000以上. 对高频(5.5 GHz附近)FBAR来说, 并联谐振品质因数可以提升300以上. 对横向寄生模式较强的高频FBAR, 优选的Frame结构可以提升谐振器的横向寄生模式抑制, 使串联谐振频率之下的阻抗相位波动减少5°以上.

关键词: 薄膜体声波谐振器; 框架结构; 流片实验; 阻抗相位波动

基金项目: 国家自然科学基金(No.U20A20203, No.61971052); 北京邮电大学中央高校基本科研业务费行动计划项目(No.2021XD-A07-2); 广东省重点领域研发计划项目(No.2020B0101080001)

中图分类号: TN385

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112(2024)02-0407-07

电子学报URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.12263/DZXB.20220346

The Performance Improvement of Thin Film Bulk Acoustic Resonators by Frame Structure

WU Yong-le¹, WU Hao-peng², LAI Zhi-guo³, CAI Xun³, TANG Bin³, YANG Qing-hua^{2,3},
YANG Yu-hao¹, WANG Wei-min^{2*}

(1. School of Integrated Circuits, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China;
2. School of Electronic Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China;
3. HunterSun Electronics Company, Ltd., Suzhou, Jiangsu 215000, China)

Abstract: The effect of frame on the performance improvement of thin film bulk acoustic resonator(FBAR)is studied. Based on the basic theory of reflection and matching of two kinds of frame structures to keep acoustic energy, according to their functional characteristics, several groups of frame microstructure combinations of low frequency and high frequency are determined experimentally, and the two groups of FBAR are taped out. Finally, the resonator of all groups is obtained by on-wafer test. The selected frame structure group can improve the performance of both low-frequency and high-frequency FBAR. For low frequency (around 1.7 GHz) FBAR, the quality factor of parallel resonance can be increased by more than 1 000. For high frequency (around 5.5 GHz) FBAR, the quality factor of parallel resonance can be increased by more than 300. For the high frequency FBAR with strong transverse parasitic mode, the optimized frame structure can improve the transverse parasitic suppression and reduce the impedance phase fluctuation under the series resonant frequency by more than 5°.

Key words: film bulk acoustic resonator; frame structure; taping out experiment; impedance phase fluctuation

Foundation Item(s): National Natural Science Foundation of China (No.U20A20203, No.6197052); Fundamental Research Funds for the Central Universities of Beijing University of Posts and Telecommunications (No.2021XD-A07-2); Key Research and Development Project of Guangdong Province (No.2020B0101080001)

1 引言

在第五代(5th Generation, 5G)移动通信系统迅速发展的今天,终端射频前端模组在整个系统中承担着重要作用. 其中,声波滤波器借由其高集成和高频率选择性等优势成为占据主要地位的滤波器件. 其中,薄膜体声波(Film Bulk Acoustic Resonator, FBAR)滤波器件具有广阔的发展前景. 然而,三明治结构的传统FBAR由于有限的横向尺寸以及缺少声能保持结构造成其横向寄生剪切模式加剧,进而导致声能的泄露. 声能的泄露会影响FBAR器件的品质因数,大大增加其机械损耗. 其中,FBAR的微结构对FBAR谐振器的性能提升具有巨大作用,其中框架(Frame)结构是最主要的微结构. 对Frame结构进行详尽的实验研究,有利于大大提升FBAR谐振器性能,从而使FBAR滤波器性能进一步提升. 在相关研究中,有多种形式的FBAR微结构,其中Frame结构是保存声学能量使其不再泄露的最佳方式^[1]. 然而,在实际的流片加工中,不同Frame结构之间的过渡带将会侵蚀一部分的结构尺寸,从而使其理论值和最佳值之间存在偏差. 基于不同尺寸的微结构组合来寻找最佳性能FBAR谐振器是较好的方式.

2 Frame结构简介

Frame结构最早在2003年由Infineon的日籍工程师Kaitila提出并应用在类型I谐振器中^[2]. 具体来说,Frame微结构具体分为两种结构,一种为凸起框架,另一种为凹陷框架. 这两种结构相互配合,可以使FBAR性能提升,从而使FBAR滤波器性能得到相应的提升. 其物理结构如图1所示,凸起框架结构主要是在FBAR的顶电极边缘附近对电极进行厚度增加,增加FBAR横向声波能量与空气界面的阻抗不匹配程度,加强反射,使机械声能尽可能地被保存在FBAR的有源谐振区域内. 也就是说,凸起框架结构的作用为抑制横波从有源区向无源区泄露,由于声能泄露造成的黏性损耗增加主要影响并联谐振品质因数(Q_p),而电极互联结构导致的欧姆损耗则主要影响串联谐振品质因数(Q_s),因此凸起框架结构可以提升FBAR的 Q_p . 下面将具体地通过阻抗匹配反射的方式来对凸起框架结构的应用原理进行解释.

如图1所示,可以看出FBAR的纵向示意图共有3个区域:区域I、区域II以及区域III. 区域I为FBAR的有效谐振区域(三明治结构和底层空气腔的重合部分),区域II为凸起框架区域(顶电极有凸起),区域III为空气反射无源部分(空气界面). 由于声阻抗 $Z_I > Z_{II}$,为了达到抑制横波泄露加强横波反射的目的,

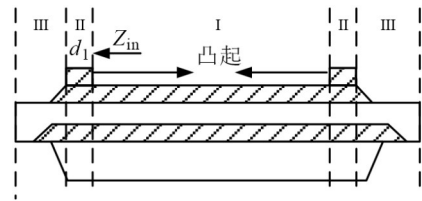


图1 凸起框架Frame结构示意图

有必要使 $Z_{II} > Z_I > Z_{III}$,令 $d = \lambda/4$ (利用 $\lambda/4$ 传输线阻抗变换原理),得 $Z_{in} = Z_{II}^2/Z_{III}$,由于空气的密度极小,所以其声阻抗(Z_{III})值极小,故输入阻抗(Z_{in})将会被转化为极大值. 因此,凸起框架结构的添加使区域I和区域III之间产生了较好的阻抗失配,使横向泄露的声能反射回压电晶体薄膜内部,保存了声能,提高了 Q_p . 但是凸起框架结构存在两个副作用. 第一个是由于加强了空气界面和有效谐振区域的阻抗失配,FBAR的横向寄生相应增强. 第二个是由于边缘效应的出现,FBAR框架附近出现了等效电容,并联的等效电容会减少FBAR的等效机电耦合系数.

为了弥补凸起框架结构带来的负面效应,需要凹陷框架结构的辅助. 凹陷框架结构的示意图如图2所示,其中的区域II为凹陷框架结构的有效区域,其他参数与图1中的相同. 对于凹陷框架来说,有必要使 $Z_I > Z_{II} > Z_{III}$. 由于FBAR的串联谐振频率附近存在较强的寄生模式,即瑞利兰姆波模式(Rayleigh-Lamb Modes),所以寄生模式会引入涡流损耗降低 Q_s . 所以凹陷框架的作用是加强横波从有源区向无源区的传播,从而抑制串联谐振频率之下的寄生模式,提升 Q_s . 由于凹陷框架结构会减弱FBAR边缘的寄生电容效应,所以其也会在一定程度上提升等效机电耦合系数. 但是由于加强了横波的泄露, Q_p 下降. 下面具体阐述 Q_p 和 Q_s 受到影响的方式,以支撑后续指标的选择. 其中:

Q_p 为并联谐振频率处的品质因数,主要受到声能损耗的影响,通过凸起框架结构对声能高效的反射储存可以较为明显地提升其数值.

Q_s 为串联谐振频率处的品质因数,主要受到欧姆损耗的影响,欧姆损耗主要通过FBAR的电极的面积和电极的厚度反映出来. 凹陷框架结构由于主要作用是减小横向寄生模式,可以小幅度提升 Q_s .

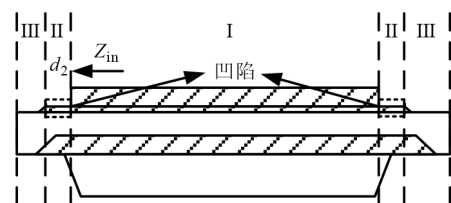


图2 凹陷框架Frame结构示意图

对于单独的 FBAR 谐振器来说,其基于 mBVD 模型的等效阻抗表达式^[3]为

$$Z(\omega) = j\omega L_x + R_x + \left[\frac{1}{R_0 + \frac{1}{j\omega C_0}} + \frac{1}{R_1 + j\left(\omega L_1 - \frac{1}{\omega C_1}\right)} \right]^{-1} \quad (1)$$

其中, R_x 是由金属电极导致的一直存在的阻抗,电感 L_x 是由于测量配置(晶片上的器件布局)而产生的, R_1 与系统中任何来源的声学损耗相关联. 将并联谐振品质因数定义为

$$Q_p = + \frac{1}{2} \omega_p \frac{\partial \varphi}{\partial \omega} \Big|_{\omega = \omega_p} \quad (2)$$

其中, φ 是阻抗的相位角. 将式(1)和式(2)联立可得到

$$Q_p \approx \frac{\omega_p L_1}{R_0 + R_1} \quad (3)$$

对于单个谐振器来说,凸起结构减小 R_0 , 即增大 Q_p , 而对于整个电路来说,谐振器整体 Q_p 值增大最直观的体现就是通带内插损有所优化.

如图 3 所示,在引入了凸起结构后,谐振器的 Q_p 由 725 增加到 927, FBAR 滤波器的带内插损最小值由 1.4 dB 优化到 0.6 dB.

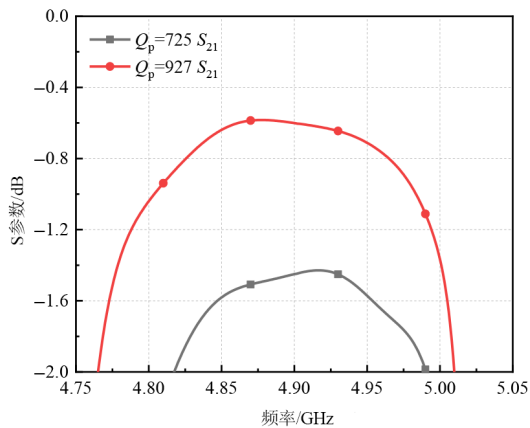
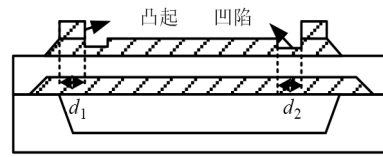


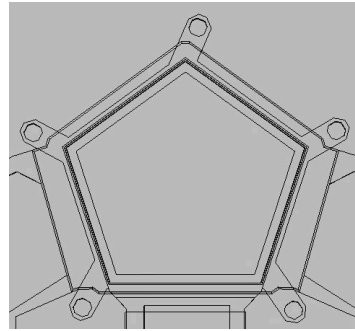
图 3 引入凸起结构前后的 FBAR 滤波器插损示意图

综上所述,凸起框架结构和凹陷框架结构对 FBAR 的性能作用是相反的,同时具有凸起框架结构和凹陷框架结构的 FBAR 截面示意图、俯视平面图、三维建模示意图,以及其三维建模缩放示意图如图 4 所示. 可以看出,凹陷框架被设置在凸起框架内部,更加靠近有效谐振区域.

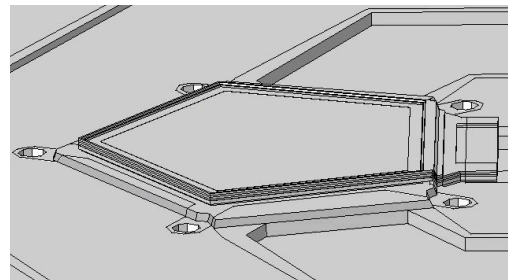
下面对凸起框架和凹陷框架结构的横向尺寸进行分组实验,具体的就是将宽度 d_1 和 d_2 进行相应的分组.



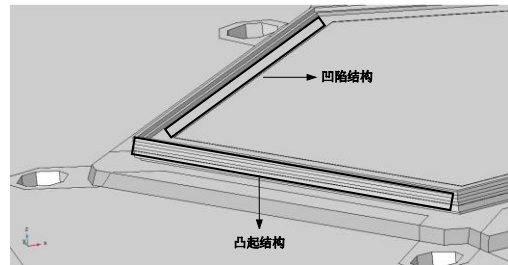
(a) 横向截面图



(b) 俯视平面图



(c) 三维建模示意图



(d) 三维建模缩放示意图

图 4 同时具有凸起框架和凹陷框架结构的 FBAR 示意图

3 Frame 结构分组

3.1 问题描述

FBAR 的有效谐振区域边缘的示意图如图 5 所示. 可以很明显的看出,在凸起框架结构和凹陷框架结构之间存在额外的过渡带,这种过渡带会影响凸起框架和凹陷框架在流片中的实际尺寸从而干扰对 FBAR 的有效性. 合理地调整凸起框架和凹陷框架结构的尺寸可以很好地解决上述问题. 下面分别对低频和高频的谐振器 Frame 结构进行分组讨论.

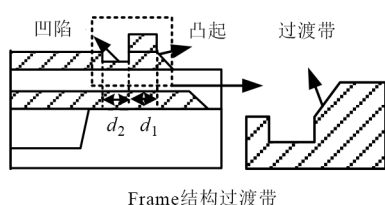


图5 凸起框架和凹陷框架的过渡带示意图

3.2 低频 Frame 结构分组

根据第一节对框架微结构的详细介绍,可以确定图4中的两种微结构的基准可以由式(4)确定:

$$d_1 = d_2 = \frac{\lambda}{4} = \frac{v}{4f} \quad (4)$$

其中, λ 是纵向声波在压电材料中的传播波长,也就是在氮化铝(aluminum nitride, AlN)中的波长; v 则是声波在 AlN 中传播的纵波声速。

由于声速的测量比较困难,目前为止利用飞秒脉冲声纳测量^[4]固体中声波的传播速度是最精确的方式。然而这种方式需要的成本较高,所以采用文献[5]中的纵波声速提取方式来获得所需要的数据,因为本次流片所使用的工艺与文献[5]中工艺相同,并且频率也是 1.7 GHz 附近。那么从文献中获取的 AlN 声速为 12 114.9 m/s。利用式(4)计算得到的 Frame 结构在 1.7 GHz 和 5 GHz 处宽度如表 1 所示。

表1 凸起框架 d_1 和凹陷框架 d_2 标准尺寸

频率/GHz	标准尺寸/ μm
1.7	1.78
5.0	0.61

根据经验设置表2中所示的11个分组来进行流片实验。

表2 低频凸起框架和凹陷框架的分组信息 单位: μm

分组序号	凸起框架范围	凹陷框架范围
S1~S9	2.0~7.0	6.0~10.0
S10	4.0	0
S11	0	0

从表中可以看出,对凸起框架从 2.0~7.0 μm 进行分组,对凹陷框架从 6~10 μm 进行分组(由于精度问题,框架结构的宽度被设置为 $\lambda/4+n\lambda$,周期性)。其他 FBAR 的谐振结构保持一致,那么共有 9 组,分组 S10 和分组 S11 为对照组。在分组 S10 中,凹陷框架的宽度设置为零。在分组 S11 中,所有的微结构都不被设置。

3.3 高频 Frame 结构分组

在完成了低频的 Frame 结构分组之后,对 5 GHz 以上的微结构进行分组设置。同样,利用式(4)再次计算,将频率设置为 5 GHz。值得注意的是,随着频率的增加到 5 GHz,并没有修改声波在 AlN 中传播的速

度,因为没有证据表明随着频率的增加,材料参数会产生变化。确定这点之后,计算得到凸起框架和凹陷框架的标准尺寸为 0.61 μm 。然而,受薄膜沉积工艺以及精度的限制(凸起框架结构和凹陷框架结构均采用抬起去除(Lift off, LF)工艺实现,其精度最大为 1 μm ,偏移量为 $\pm 5\%$),将最小宽度设置为如表 3 中所示的数值。

表3 高频凸起框架和凹陷框架的分组信息 单位: μm

分组序号	凸起框架范围	凹陷框架范围
S1~S9	1.0~5.0	2.0~6.0
S10	2.0	0
S11	0	0

从表中可以看出,对凸起框架从 1.0~5.0 μm 进行分组,对凹陷框架从 2.0~6.0 μm 进行分组(同样由于精度问题,框架结构的宽度被设置为 $\lambda/4+n\lambda$,周期性)。其他 FBAR 的谐振结构保持一致。与低频分组相同,分组 S10 和 S11 为对照组。

在完成了分组设计之后,对绘制的版图进行光刻流片以及片上测试等环节,具体见下一节。

4 Frame 结构版图绘制及片上测试

在分别完成了高低频分组结构的版图绘制之后(FBAR 面积均根据 50 Ω 等效阻抗面积来设定^[6]),进行 FBAR 的拼版流片工作。每一个单独的分组设置多个重复测试单元来确保后续利用测试得到的性能中位值来进行对 Frame 结构性能的数据处理和分析^[7]。研究低高频结构对宽带混合滤波器的设计具有重要意义^[8](由于其频带横跨低频到高频的范围)。

图6中展示了片上测试的自动探针基台以及晶圆示意图,具体的从分组到测试的实验流程如下:

- (1)确定 FBAR 谐振器的应用频段;
- (2)根据微结构的分组确定微结构的组合,并进行单端口 FBAR 版图绘制;
- (3)片上测试之后进行数据处理,将不同的微结构组合所代表的性能一一对应;
- (4)对测试得到的数据进行分析,确定 Frame 结构对 FBAR 性能的作用规律。

5 结果与分析

5.1 低频测试结果统计分析

由于每一个单独的 Frame 结构分组在拼版的过程中都设置了 69 个重复的测试单元,所以测试结果利用 MATLAB 进行数据分析,得到性能分布的中位值。挑选其中具有代表性的分组进行对 Frame 结构的分析。表4中展示了挑选得到的分组 9 和分组 11 的关键性能数据中位值对比。

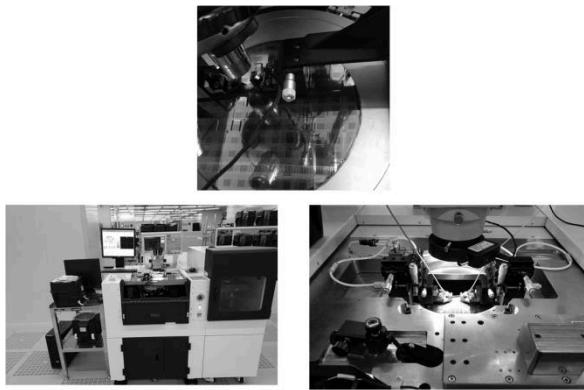


图6 片上测试基台以及晶圆具体示意图

表4 低频分组9和分组11关键性能数据中位值对比

性能参数	分组9 (具有Frame结构)	分组11 (无Frame结构)
Q_s	1 300	1 050
Q_p	1 500	450
k_{eff}^2	6.50%	6.82%

从表中可以得到,具有Frame结构的分组9相较于对照组分组11在串并联品质因数方面均有提升, Q_p 的提升达到了1 000以上,凸起结构对提升 Q_p 具有较大作用, Q_p 的增大意味着谐振器本身的损耗大幅度减小.凸起结构等效为FBAR两端并联一个电容,反之,凹陷结构可等效为减小本身电容,因此极点耦合系数略有下降,下降幅度达到0.32%,导致谐振器本身带宽减小.图7中展示了上述两个分组的Smith圆图输入阻抗分布.

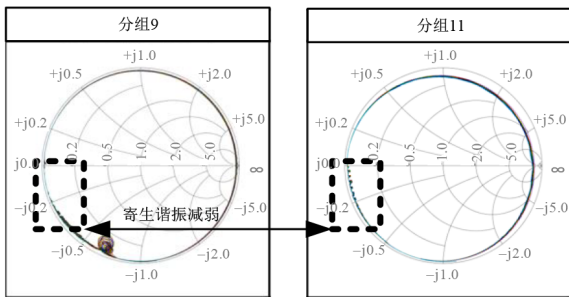


图7 低频数据统计得到的输入阻抗在Smith圆图上的分布

从图7中可以看出,圆图左边 $j0.0$ 处是串联谐振点,为阻抗最小值.由于FBAR是II型谐振,所以其寄生模式出现在低于串联谐振频率处.由于Frame结构的加入,FBAR在机械振动时,谐振器边缘的位移振动更阶梯化,减少了剪切模式的出现,即寄生模式.加入Frame结构的分组9的横向寄生模式激发带来的额外谐振阻抗波动大大减小.然而,其会在FBAR的低频处引入一个较大的谐振峰值,这个谐振峰通常会干扰到对低频信号的带外抑制(若所设计滤波器需要低频近阻

带抑制).

5.2 高频测试结果统计分析

同样的,在高于5 GHz的流片实验中.采用相同的光刻板进行不同厚度的薄膜沉积从而得到较为高频的FBAR谐振器.经过MATLAB处理过后,同样挑选出性能相对最优秀的分组1和对照组分组11来进行中位值数据的对比.

如表5所示,在高频情况下,具有Frame结构的FBAR的品质因数均有提升,但是提升幅度较小,为160~300.等效机电耦合系数也有略微下降,下降幅度为0.45%,导致谐振器的损耗及带宽均小幅度减小.

表5 高频分组1和分组11关键性能数据中位值对比

性能参数	分组1 (具有Frame结构)	分组11 (无Frame结构)
Q_s	610	450
Q_p	900	600
k_{eff}^2	5.75%	6.20%

对于其他用于FBAR的微结构,文献[9]中在谐振器上增加空气桥,能有效减小FBAR的寄生电容,因此 Q 值在1.88 GHz处提高了350%左右;文献[10]首先在传统谐振器基础上加一层与压电材料层相邻设置的非压电材料(np),np材料防止FBAR在阻抗不连续平面处所产生的活塞模式激励,这减小了连续光谱散射产生的辐射损失,因此谐振器 Q 值在2 GHz处提高了约1 440.并在此基础上设置了np材料层和电极之间的空气桥,作用原理同文献[9],使谐振器相比无微结构谐振器 Q 值在2 GHz处提高约2 080.

相比之下,空气桥和np层的引入能够更大幅度地提高FBAR的 Q 值,但是空气桥本质上是一种悬桥式结构,需要蚀刻在谐振器内部,而np同样需要加工在压电层和电极之间,它们对工艺有着较大的挑战:成本较高,且复杂的流程会严重影响产品良率.Frame结构设置在谐振器外部,其对流片过程不会有很大影响,且对 Q 值的提升仍有不俗的表现,性价比较高.

为了更直观地对比,表6展示了不同微结构对FBAR的 Q 值提升对比.

表6 微结构对FBAR的 Q 值提升对比

对比文献	工作频率/GHz	最高 Q 值提升
文献[9]	1.88	2 800
文献[10]	2.00	2 080
本文成果	1.70	1 050
本文成果	5.00	300

图8中具体地展示了上述两个分组的Smith圆图输入阻抗随频率的分布.

由图8可知,经过合理的筛选,高频情况下的寄生

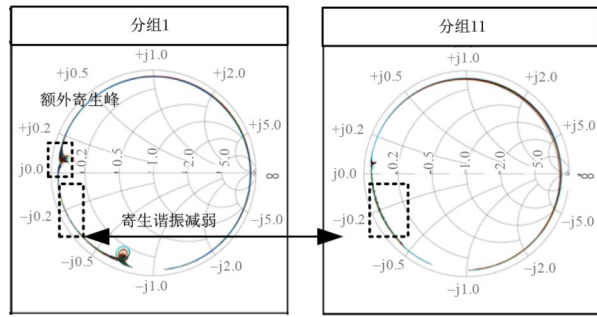


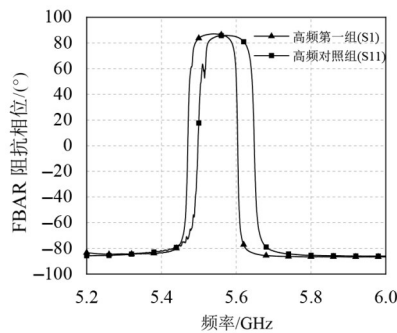
图8 高频数据统计得到的输入阻抗在Smith圆图上的分布

谐振也可以通过Frame结构来进行良好的抑制. 除此之外,Frame结构在串联谐振频率之上引入的额外寄生峰在高频FBAR中表现得额外明显. 这里引入另一个用来判断横向寄生模式强弱的指标:FBAR的阻抗相位波动,其相位波动绝对值会映射横向寄生模式强弱.

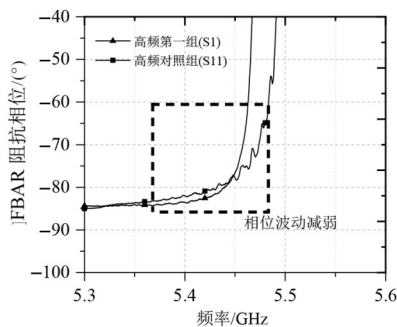
图9中展示了高频情况下的分组1和分组11实测的FBAR阻抗相位-频率曲线. 从图中可以看出,两组曲线的基频有略微偏移. 图9(b)的局部放大图中,串联谐振频率之下的相位波动从 5° 以上缩减到几乎不可见,实现了阻抗相位 5° 以上的寄生模式抑制.

6 结束语

本文首先介绍了Frame结构的物理结构和作用于



(a) 阻抗相位示意图



(b) 阻抗相位局部放大示意图

图9 分组1和分组11的阻抗相位对比图

FBAR谐振器的机理,明确了其对FBAR最重要的串并联谐振品质因数和等效机电耦合系数的提升方向. 进而通过声学阻抗反射匹配理论确定低频和低频微结构的分组尺寸. 通过版图绘制和流片测试得到了经过软件批量处理的分组测试性能箱线图. 结合片上测试阻抗在Smith圆图上的分布对数据进行了分析. 通过分析确定了Frame结构对低频和低频FBAR的性能提升机理. 在较为优秀的分组中,低频FBAR的品质因数可以提升 $250\sim 1\ 050(Q_s$ 和 $Q_p)$,高频FBAR的品质因数可以提升 $160\sim 300(Q_s$ 和 $Q_p)$. 同时对横向寄生模式较强的高频FBAR来说,通过对其阻抗相位的对比,可以将横向寄生模式带来的阻抗相位波动减少 5° 以上. 总的来说,通过实验来研究FBAR的Frame结构提升其性能的规律,对FBAR滤波器件的数据选择和性能提升具有重要意义.

参考文献

- [1] 张乾坤. 基于氮化铝(AIN)薄膜的薄膜体声波谐振器(FBAR)研究[D]. 天津: 天津理工大学, 2013.
ZHANG Q K. Study on Thin Film Bulk Acoustic Resonator (FBAR) Based on AlN Thin Film[D]. Tianjin: Tianjin University of Technology, 2013. (in Chinese)
- [2] MARKSTEINER S, FATTINGER G, AIGNER R, et al. Acoustic Reflector for a BAW Resonator Providing Specified Reflection of Both Shear Waves and Longitudinal Waves: US6933807[P]. 2005-08-23.
- [3] HASHIMOTO K. Rf Bulk Acoustic Wave Filters for Communications[M]. Norwood: Artech House, 2009.
- [4] AIGNER R. Bringing BAW technology into volume production: The ten commandments and the seven deadly sins [C]//2007 IEEE International Symposium on Acoustic Wave Devices for Future Mobile Communication Systems. Piscataway: IEEE, 2007: 1-7.
- [5] WU H P, CAI X, WU Y L, et al. An investigation on extraction of material parameters in longitudinal mode of FBAR[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs, 2020, 67(6): 1024-1028.
- [6] JAMNEALA T, BRADLEY P, KOELLE U B, et al. Modified mason model for bulk acoustic wave resonators[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2008, 55(9): 2025-2029.
- [7] ZOU Q, FENG C, NIKKEL P, et al. Acoustic Resonator Device With Air-Ring and Temperature Compensating Layer: US9401691[P]. 2016-07-26.
- [8] WU H P, WU Y L, LAI Z G, et al. A hybrid filter with extremely wide bandwidth and high selectivity using FBAR

network[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs, 2022, 69(7): 3164-3168.

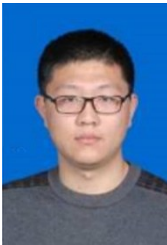
- [9] BURAK D, NIKKEL P, FENG C, et al. Film Bulk Acoustic Resonator Comprising a Bridge: US9203374[P]. 2015-12-01.
- [10] SHIRAKAWA A, BURAK D, NIKKEL P. Bulk Acoustic Resonator Comprising Non-Piezoelectric Layer and Bridge: US20120319534[P]. 2012-12-20.

作者简介



吴永乐 男,1983年出生,湖南岳阳人.北京邮电大学集成电路学院教授、博士生导师.主要研究方向为微波基础理论、微波电路、多维复合天线与射频芯片等.

E-mail: ywu@bupt.edu.cn



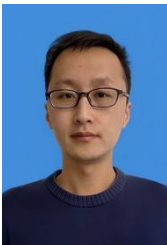
吴昊鹏 男,1995年出生,山东淄博人.北京邮电大学电子工程学院电子科学与技术专业博士研究生.主要研究方向为薄膜体声波器件,混合滤波器器件.

E-mail: wuhaopeng@bupt.edu.cn



赖志国 男,1977年出生,浙江乐清人.苏州汉天下电子有限公司CTO.主要研究方向为移动终端射频前端芯片.

E-mail: zhiguo.lai@huntersuntech.com



蔡洵 男,1990年出生,湖北荆州人.2016年毕业于西南科技大学电子工程系,获硕士学位.毕业后加入汉天下电子有限公司.主要研究方向为体声波滤波器器件的设计与模型开发.

E-mail: xun.cai@huntersuntech.com



唐滨 男,1987年出生,吉林吉林人.本科毕业于天津大学测控技术与仪器专业.研究生毕业于天津大学仪器科学与技术专业.现工作于苏州汉天下电子有限公司工艺研发部.专注FBAR领域10余年,获专利20余项.成功量产多款FBAR产品.

E-mail: xiafei.wang@huntersuntech.com



杨清华 男,1976年出生,贵州凯里人.北京邮电大学电子工程学院高级工程师(教授级).苏州汉天下电子有限公司董事长.主要研究方向为微波电路与射频芯片等.

E-mail: aaron.yang@bupt.edu.cn



杨雨豪 男,1996年出生,四川乐山人.北京邮电大学电子工程学院电子科学与技术专业博士研究生.主要研究方向为微波无源器件,集成无源元件技术.

E-mail: yangyuhao1996@gmail.com



王卫民 女,1977年出生,山东临沂人.北京邮电大学电子工程学院教授、博士生导师.主要研究方向为微波电路、电磁场基础理论与天线测试.

E-mail: wangwm@bupt.edu.cn