

# 杂模抑制薄膜体声波谐振器的仿真分析

罗恩雄<sup>1</sup>, 张必壮<sup>1</sup>, 吴坤<sup>1</sup>, 马晋毅<sup>1</sup>, 李思忍<sup>2</sup>

(1. 中国电科芯片技术研究院, 重庆 401332;

2. 柳州市计量技术测试研究所, 广西 柳州 545001)

**摘要:**该文研究了电极边界阶梯结构对薄膜体声波谐振器(FBAR)杂波的影响。采用有限元仿真法讨论了阶梯结构宽度尺寸对杂波的抑制效果,结合振型分析该结构能抑制声波能量的泄露,提高器件品质因数。为了进一步验证仿真结果,实验制备了FBAR器件。测试结果表明,当该阶梯结构凸起宽度为 $3\ \mu\text{m}$ ,凹陷宽度为 $1.5\ \mu\text{m}$ 时,谐振器杂波被有效抑制,反谐振频率处的品质因数约增大100。

**关键词:**薄膜体声波谐振器(FBAR);阶梯结构;杂模抑制;有限元

**中图分类号:** TN65 **文献标识码:** A

## Simulation Analysis of a Thin-Film Bulk Acoustic-Wave Resonator for Spurious-Mode Suppression

LUO Enxiong<sup>1</sup>, ZHANG Bizhuang<sup>1</sup>, WU Kun<sup>1</sup>, MA Jinyi<sup>1</sup>, LI Siren<sup>2</sup>

(1. CETC Academy of Chips Technology, Chongqing 401332, China;

2. Liuzhou Measuring Technology Testing Institute, Liuzhou 545001, China)

**Abstract:** In this study, the effect of the electrode-boundary step structure on the spurious mode of thin-film bulk acoustic resonators (FBARs) is investigated. The finite-element simulation method is used to investigate the effect of the width dimension of the step structure on the suppression of spurious modes. The step structure is analyzed in conjunction with the vibration pattern to suppress the leakage of acoustic energy and to improve the quality factor of the device. To further verify the simulation results, FBAR devices are experimentally prepared. The results show that when the width of the raised frame is  $3\ \mu\text{m}$  and the width of the recessed frame is  $1.5\ \mu\text{m}$ , the resonator spurious mode is effectively suppressed and the quality factor at the anti-resonance frequency is increased by about 100.

**Key words:** thin film bulk acoustic resonators (FBAR); step structure; spurious mode suppression; finite element

## 0 引言

近年来,随着5G技术的急速发展,基于声表面波(SAW)和体声波(BAW)的声学滤波器得到了快速发展<sup>[1]</sup>。薄膜体声波谐振器(FBAR)滤波器作为BAW滤波器的常用结构,具有低的插入损耗、高的功率容量、适用于高频段和使用与CMOS工艺兼容的制备工艺<sup>[2]</sup>等优势,是目前唯一可与射频前端进行集成的滤波器<sup>[3]</sup>,使FBAR滤波器成为5G技术中滤波器的有力竞争者。

FBAR器件利用压电薄膜的压电特性,在电极两端施加交变电压激发出体声波,进而形成谐振达

到选频的目的。FBAR在形成谐振时,除能激发主要的纵向振动模式外,还能引起其他多种振动模式,其中兰姆波模态对谐振器性能的影响最大。兰姆波形成的寄生谐振在主谐振曲线中出现尖锐的寄生谐振峰,增大器件的损耗。当利用FBAR谐振器构建滤波器结构时,该寄生谐振使得滤波器通带内产生波纹,增大滤波器插入损耗。A. Link等<sup>[4]</sup>采用改变器件形状方法及Chin-Yu Chang等<sup>[5]</sup>采用一种“准自由边界”条件对抑制寄生谐振进行了研究。

本文在谐振器上电极边缘设置了一种阶梯结构的方式,通过Comsol软件仿真分析了该结构对

收稿日期:2023-12-06

作者简介:罗恩雄(1997-),男,贵州省黔南州人,硕士生。通信作者:马晋毅(1971-),男,山西省左权市人,研究员,博士。

FBAR 器件性能的影响,并进行了实验制备测试。结果表明,该结构有效地抑制了低于谐振器谐振频率的寄生振动,同时提高了反谐振频率( $f_p$ )处的品质因数(Q 值),对改善谐振器性能具有潜在的应用价值。

## 1 FBAR 器件结构模型与仿真

### 1.1 FBAR 二维有限元模型

图 1 为 FBAR 器件结构。阶梯结构设置在上电极边缘处,与电极使用相同材料。为了更接近实际工艺制备出的器件结构,提高仿真的准确性,对上下电极进行了边缘倾角处理,同时在上电极表面进行调频层覆盖,形成了边界阶梯结构。设压电层材料采用 AlN,底部衬底采用 Si,上下电极材料采用 Mo,支撑层材料与调频层材料均采用 AlN。衬底厚为  $5\ \mu\text{m}$ ,空气腔高度为  $1\ \mu\text{m}$ ,上下电极厚度分别为  $0.42\ \mu\text{m}$ 、 $0.39\ \mu\text{m}$ ,设上电极的横向尺寸为  $70\ \mu\text{m}$ ,支撑层厚为  $0.06\ \mu\text{m}$ ,调频层厚为  $0.15\ \mu\text{m}$ ,压电层厚为  $0.35\ \mu\text{m}$ 。阶梯结构中边界最外缘凸起厚度和紧邻的凹陷厚度相对于上电极分别增大了  $0.1\ \mu\text{m}$  和减小了  $0.02\ \mu\text{m}$ 。设凸起结构宽分别为  $2.0\ \mu\text{m}$ 、 $2.5\ \mu\text{m}$ 、 $3.0\ \mu\text{m}$ ,凹陷结构的宽分别为  $1.0\ \mu\text{m}$ 、 $1.5\ \mu\text{m}$ 、 $2.0\ \mu\text{m}$ ,研究了不同凹凸宽度组合的阶梯尺寸对 FBAR 谐振性能的影响。

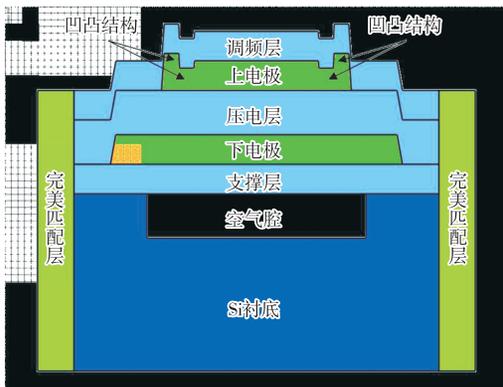
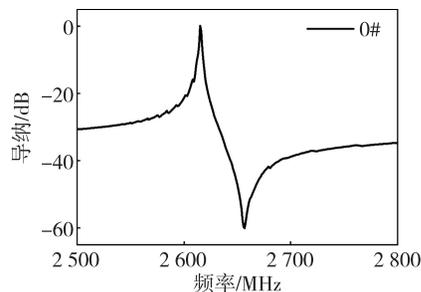
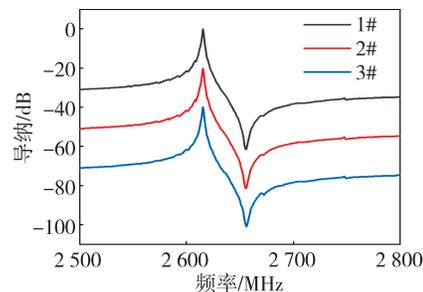


图 1 FBAR 器件结构示意图



(a) 常规结构输入导纳曲线



(b) 凸起宽度  $2.0\ \mu\text{m}$  的输入导纳曲线

### 1.2 FBAR 仿真设计

本文使用 Comsol 有限元仿真软件,对 FBAR 结构进行了固体力学与静电场两个物理场的求解分析。为了便于网格的构建和保证仿真结果的准确性,仿真采用映射网格,并对网格设置进行细化处理,网格自由度达到 20 万。在静电模块设置上电极的端口电压为  $1\ \text{V}$ ,下电极接地。最后完成模型的频域扫描研究。

### 2 仿真结果分析

为了研究不同阶梯尺寸对 FBAR 器件性能的影响,设计了 9 组不同结构尺寸的谐振器,如表 1 所示。固定阶梯结构中,边界最外缘凸起厚度为  $0.1\ \mu\text{m}$ ,紧邻的凹陷厚度为  $0.02\ \mu\text{m}$ 。实验中,0# 为无阶梯结构的常规谐振器。

表 1 不同凹陷、凸起尺寸的谐振器结构参数

方案	凸起宽度/ $\mu\text{m}$	凹陷宽度/ $\mu\text{m}$
1#	2.0	1.0
2#	2.0	1.5
3#	2.0	2.0
4#	2.5	1.0
5#	2.5	1.5
6#	2.5	2.0
7#	3.0	1.0
8#	3.0	1.5
9#	3.0	2.0

仿真结果如图 2 所示。为了比较不同结构的仿真结果,对谐振器导纳曲线依次向下平移  $20\ \text{dB}$ 。由图 2 可知,当固定凸起宽度时,随着凹陷宽度的增加,小于串联谐振频率( $f_s$ )的杂波波纹逐渐减弱,表明寄生谐振得到了有效抑制。当凸起宽度为  $2.0\ \mu\text{m}$ 、 $2.5\ \mu\text{m}$  时,在略大于  $f_p$  附近出现了较强的寄生谐振。

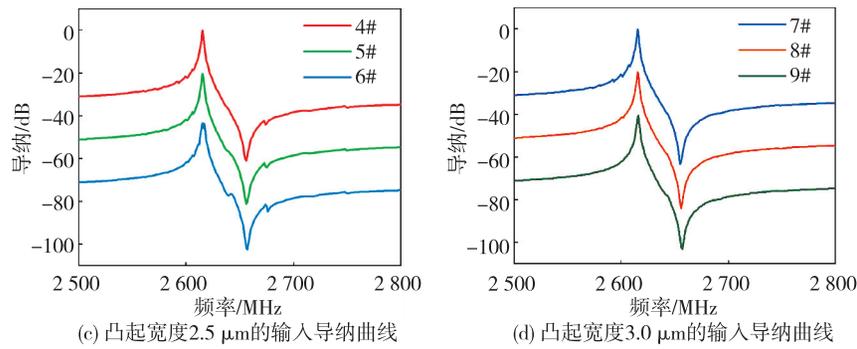


图 2 不同凹凸结构仿真结果

对比图 2(a)、(c)可知,6#方案(凸起宽度为  $2.5\ \mu\text{m}$ ,凹陷宽度为  $2\ \mu\text{m}$ )中,在  $f_s$ 、 $f_p$  间产生了较强的寄生谐振,甚至产生了直接影响  $f_s$  的次级谐振,次级谐振点处的振型如图 3 所示,边缘阶梯结构处振动位移增大,这是由于阶梯结构的引入激发了新的谐振,导致输入导纳产生变化。因此,需要对阶梯结构进行优化设计,抑制杂波的同时,避免引入新的寄生谐振。

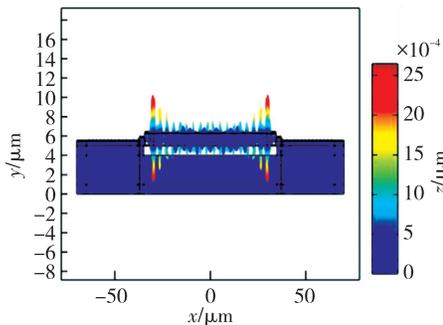


图 3 6#方案次级谐振点处振动位移图

根据以上分析和图 2(d)可知,8#、9#方案抑制杂波效果较优。8#、9#方案的阻抗曲线如图 4 所示。谐振器的能量损耗和  $Q$  值相关,谐振器  $f_p$  处的  $Q$  值主要与能量的有效利用有关<sup>[6]</sup>, $f_p$  处的阻抗越大,声波能量的泄露越小, $Q$  值越高,器件损耗越小。

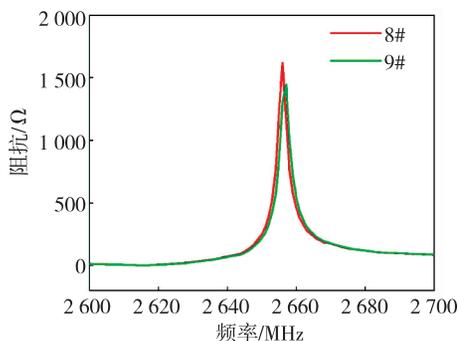


图 4 8#、9#方案输入阻抗仿真结果

由图 4 可知,与 9#方案相比,8#方案在  $f_p$  处的阻抗最大,表明声波的能量被有效约束, $f_p$  处的  $Q$  值最大。

图 5 绘制了谐振器左半部分在  $f_p$  处的振动位移剖面,边界结构设置越好,有效区域在  $f_p$  处的振动位移越小,外部区域的波泄露越小<sup>[7]</sup>。由图 5 可知,常规结构谐振器外部区域的变形较大,而采用优化后阶梯结构外部区域的变形得到了改善,振动位移更平坦。综上所述,阶梯结构的引入,将声波能量集中限制在谐振器有效区域内,向外部区域能量的泄露减小,器件损耗降低,提高了器件的  $Q$  值,这解释了谐振器在  $f_p$  处  $Q$  值增大的原因。

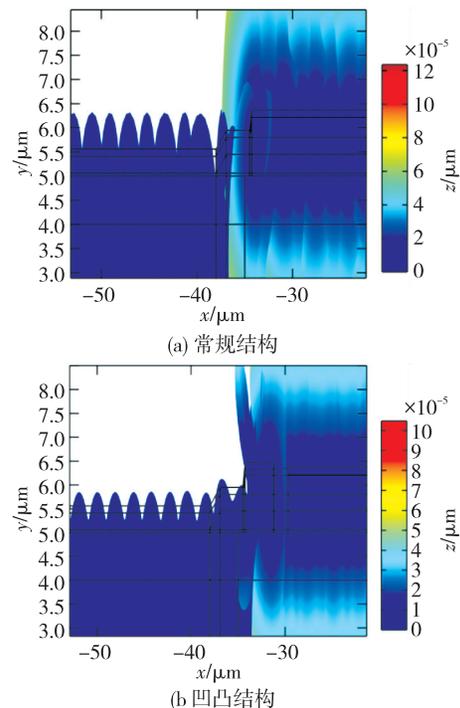


图 5 谐振器  $f_p$  处振动位移局部放大图

已有研究证明,上电极边界凸起结构能增大谐振器  $f_p$  处的  $Q$  值<sup>[8]</sup>。保持其他结构尺寸不变,在 8

#方案基础上,去掉凹陷结构,仿真仅含凸起结构对FBAR谐振器性能的影响,仿真结果如图6中的10#方案所示。

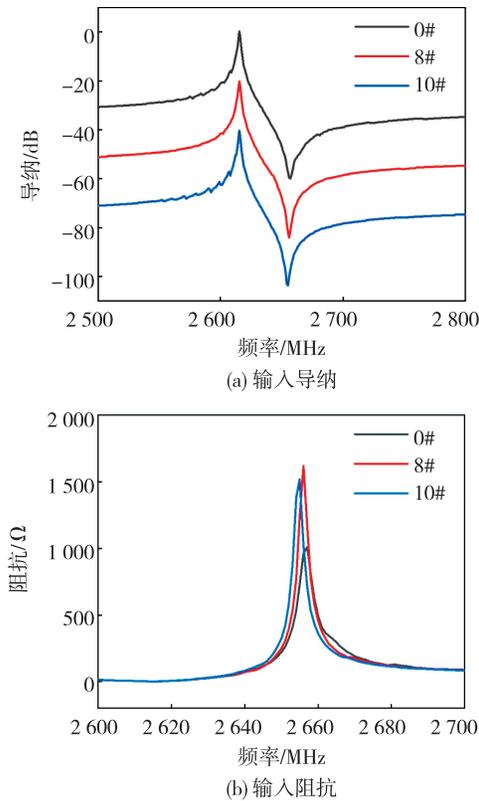


图6 不同结构仿真结果

由图6(a)可知,阶梯结构杂波抑制效果最优,凸起结构增强了小于 $f_s$ 的寄生谐振。由图6(b)可知,与常规结构相比,在 $f_p$ 处,阶梯结构与凸起结构的阻抗均得到增强,FBAR器件 $f_p$ 处的Q值也得到增大。同时,阶梯结构的输入阻抗大于凸起结构的输入阻抗,表明该阶梯结构在减小杂波和增大谐振器Q值的方面有优越性。

### 3 实验测试结果分析

为了验证阶梯结构对FBAR谐振器杂波的影响,基于以上的仿真结果,成功制备了常规结构、凸起结构和阶梯结构的FBAR样品。通过矢量网络分析仪对FBAR谐振器进行测试,实测导纳曲线如图7所示。由图可知,常规结构和凸起结构谐振器均有明显的寄生响应,设置阶梯结构的谐振器后,寄生响应减小,表明了仿真的有效性。与常规结构谐振器相比,在 $f_p$ 处阶梯结构、凸起结构的阻抗幅值分别增加了3.9 dB和4.3 dB,器件Q值分别提高了85和102,证明了该阶梯结构在杂波抑制和提

升Q值方面的优越性。

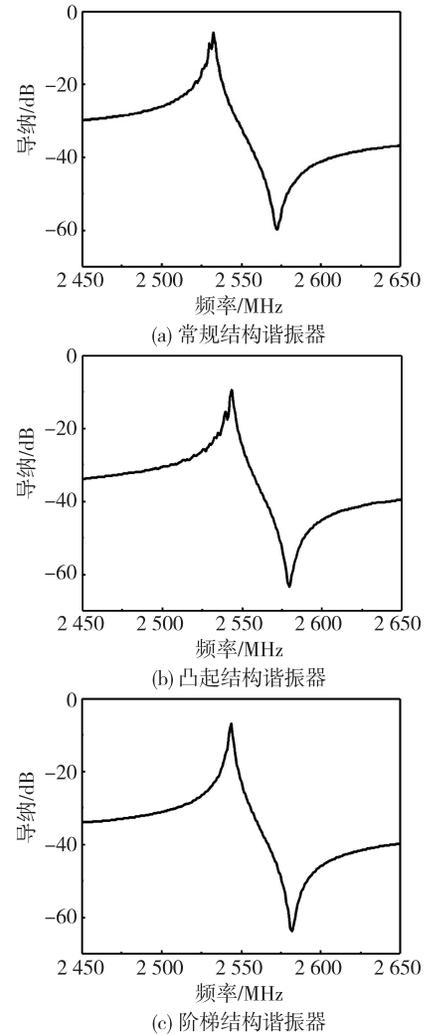


图7 FBAR谐振曲线实测结果

### 4 结束语

本文介绍了一种杂波抑制改进结构的FBAR谐振器。在FBAR器件上电极边缘设置合适的阶梯结构,抑制由兰姆波模态在谐振器串联谐振点附近产生的寄生谐振,同时将声波能量极大程度限制在谐振器有效区域内,降低器件损耗。通过有限元仿真和实测验证,与常规结构谐振器相比,该结构能够有效减弱谐振器的寄生谐振,谐振曲线更平滑,同时降低能量损耗,谐振器并联谐振点处的Q值约提高了100。

### 参考文献:

- [1] AIGNER R, FATTINGER G, SCHAEFER M, et al. BAW filters for 5G bands [C]//San Francisco, CA, USA; 2018 IEEE International Electron Devices Meeting (IEDM), 2018; 14. 5. 1-14. 5. 4.

- [2] 彭华东,徐阳,张永川,等. X 波段 FBAR 用 AlN 薄膜制备研究[J]. 压电与声光,2019,41(2):170-172.  
PENG Huadong, XU Yang, ZHANG Yongchuan, et al. Preparation of AlN films for X band FBAR devices [J]. *Piezoelectrics & Acoustooptics*, 2019, 41 (2): 170-172.
- [3] 蒋平英,蒋世义,何西良,等. S 波段低插损 FBAR 陷波器的研制[J]. 压电与声光,2021,43(2):157-160.  
JIANG Pingying, JIANG Shiyi, HE Xiliang, et al. Development of S band FBAR notch filter with low insertion loss[J]. *Piezoelectrics & Acoustooptics*, 2021, 43(2):157-160.
- [4] LINK A, SCHMIDHAMMER E, HEINZE H, et al. Suppression of spurious modes in mirror-type thin film BAW resonators using an appropriate shape of the active area[J]. *Ultrasonics Symposium Rotterdam*, 2005: 1179-1182.
- [5] CHANG C Y, HUANG Y M, HSU T H, et al. Study on the spurious modes in FBAR resonators with quasi-free edges[C]//Paris, France: 2022 Joint Conference of the European Frequency and Time Forum and IEEE International Frequency Control Symposium (EFTF/IFCS), 2022:1-3.
- [6] 杜波. 空腔型体声波滤波器及其宽带化技术研究[D]. 成都:电子科技大学, 2020.
- [7] NGUYEN N, JOHANNESSEN A, HANKE U. Design of high-Q thin film bulk acoustic resonator using dual-mode reflection [C]//Chicago, IL, USA: 2014 IEEE International Ultrasonics Symposium, 2014: 487-490.
- [8] 刘红斌,张铁林,胡晗,等. 边缘负载 FBAR 谐振器有限元仿真分析[J]. 压电与声光,2023,45(1):21-25.  
LIU Hongbin, ZHANG Tielin, HU Han, et al. Finite element simulation analysis of edge load FBAR resonators[J]. *Piezoelectrics & Acoustooptics*, 2023, 45 (1):21-25.