

异形电极调控的体声波谐振器 力-电多场耦合仿真与优化

詹雪奎, 万强, 凌明祥

(中国工程物理研究院 总体工程研究所, 四川 绵阳 621900)

摘要: 目的 抑制压电薄膜体声波谐振器 (FBAR) 寄生振动模态干扰, 提出一种异形电极调控的谐振器新结构, 并进行力-电多物理场耦合有限元建模分析与参数优化。方法 基于压电薄膜体声波谐振器的力-电耦合方程, 运用有限元方法进行参数影响仿真分析, 获得不同电极结构形状与敏感几何参数对应的谐振器阻抗特性及寄生振动模态干扰的影响规律, 并对提出的异形电极调控谐振器几何参数进行优化。结果 新型电极结构使得薄膜体声波谐振器的导纳特性曲线更加平滑, 相位波纹减少, 无明显寄生谐振峰。参数优化所得框状电极宽度为 $6\ \mu\text{m}$ 、厚度为 $0.1\ \mu\text{m}$, 谐振频率为 $1.727\ \text{GHz}$ 。结论 通过异形电极结构形状设计, 可以实现对谐振器寄生振动模态的有效抑制, 提升谐振器的性能。

关键词: 薄膜体声波谐振器; 压电效应; 多物理场耦合; 有限元; 频率响应; 寄生振动

中图分类号: TN384

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2022)06-0127-06

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2022.06.000

Electromechanical Coupling Simulation and Optimization of Film Bulk Acoustic Resonators Regulated by Shaped Electrode

ZHAN Xue-kui, WAN Qiang, LING Ming-xiang

(Institute of Systems Engineering, China Academy of Engineering Physics,
Sichuan Mianyang 621900, China)

ABSTRACT: The paper aims to suppress the parasitic vibration mode interference of the piezoelectric film bulk acoustic resonator (FBAR), propose a new structure of FBAR regulated by shaped electrode, and carry out the finite element modeling analysis and parameter optimization of the mechanical-electrical multi-physical field coupling. Based on the coupled equation of the piezoelectric film bulk acoustic resonator, the simulation analysis was carried out by employing the finite element method to obtain the impedance characteristics and the influence of parasitic vibration modal interference subjected to different electrode

收稿日期: 2021-03-24; 修订日期: 2021-04-16

Received: 2021-03-24; Revised: 2021-04-16

基金项目: 中国工程物理研究院创新发展基金 (2019YCX04011)

Fund: Innovation and Development Fund of China Academy of Engineering Physics (2019YCX04011)

作者简介: 詹雪奎 (1996—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为材料与结构的多物理场多尺度行为。

Biography: ZHAN Xue-kui (1996-), Male, Postgraduate, Research focus: multi-physical field and multi-scale behavior of materials and structures.

通讯作者: 万强 (1978—), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向为武器装备力学与研制、涂层力学性能。

Corresponding author: WAN Qiang (1978-), Male, Doctor, Researcher, Research focus: mechanical research and development of weapons and equipment, mechanical properties of coatings.

引文格式: 詹雪奎, 万强, 凌明祥. 异形电极调控的体声波谐振器力-电多场耦合仿真与优化[J]. 装备环境工程, 2022, 19(6): 127-132.

ZHAN Xue-kui, WAN Qiang, LING Ming-xiang. Electromechanical Coupling Simulation and Optimization of Film Bulk Acoustic Resonators Regulated by Shaped Electrode[J]. Equipment Environmental Engineering, 2022, 19(6): 127-132.

shapes and sensitive geometric parameters. Consequently, the optimal geometric parameters of the newly developed resonator were obtained. The finite element simulation results show that the proposed electrode shape provides smoother admittance curve, less phase ripple without obvious spurious resonance peak, the width of the frame electrode is 6 μm , the thickness is 0.1 μm , and the resonance frequency is 1.727 GHz. The shaped electrode can effectively suppress the spurious resonance and improve the performance of the resonator.

KEY WORDS: film bulk acoustic wave resonator; piezoelectric effect; multi-field coupling; finite element method; frequency response; spurious vibration

薄膜体声波谐振器 (FBAR) 利用压电材料的压电效应, 将电信号转化为声波信号, 从而形成谐振。鉴于其 GHz 超高频段和微型化特点, 且与半导体工艺兼容, 成为目前极具优势的移动通信、电子对抗和雷达等军民装备的滤波器、双工器射频前端模块^[1-3]。薄膜体声波谐振器作为传感器时具有的超高灵敏度和微型化优势, 使其逐渐在武器装备的气氛检测、振动加速度传感器、高频引力波探测等领域也释放出众多颠覆性的应用潜力^[4-7]。

FBAR 传感器以其独特的性能和广阔的前景, 成为学界和业界研究和关注的热点^[8-11]。理想的纵波模式 FBAR 声波沿厚度方向传播, 但真实情况往往伴随横向振动模式相互耦合干扰, 产生等效电阻增大、分辨率降低等不良影响。如何抑制甚至消除横向寄生谐振是 FBAR 设计的一个关键问题^[12-13]。采用一维等效模型 (如 Mason 模型或 MBVD 模型^[14]), 进行电路仿真可以简化问题, 对 FBAR 的电极厚度、材料和谐振频率等基本参数进行直观仿真分析, 但对谐振器的结构设计有一定的局限性。Liu 等^[15]采用标量微分方程, 得出解析解来研究环形电极 FBAR, 该结构能较好地能量限制在电极中心环形谐振区域内, 但同样对问题进行近似处理。采用有限元方法 (FEM) 则能模拟谐振器结构对振动模态和器件性能的影响, 其优点是直接对 FBAR 的力-电耦合问题进行三维分析^[16-17], 不需要简化控制方程, 计算出接近真实的数据, 从而对器件的结构设计提供有效指导。Lee 等^[18]利用有限元方法设计了 AlN 压电薄膜谐振器的边框型电极结构, 并分析了频率响应的规律, 一定程度抑制了寄生谐振的影响。Bhatia 等^[19]对三维矩形齿状电极结构 FBAR 进行了三维有限元仿真分析, 获得高品质因数的 MEMS 谐振器。

本文在进行 FBAR 谐振器力-电多物理场耦合仿真参数影响规律研究的基础上, 提出一种异形电极调控的谐振器新结构。获得了不同电极结构形状和敏感参数对应的谐振器阻抗特性及寄生振动模态干扰的影响规律, 通过设计不规则四边形电极结构, 并加厚电极边缘以增加谐振器的边缘质量负载, 实现对寄生谐振的有效抑制, 谐振器的品质因素得到了一定程度的改善。

1 FBAR 基本原理

FBAR 的基本结构如图 1 所示, 工作原理如图 2 所示。谐振器主体部分为上下电极层和压电层构成的三明治结构。当上下电极施加交变电场时, 谐振器通过压电效应将电信号转换为声波信号, 在厚度方向激发纵波模式的体声波, 限制压电层的声波在不同介质交界面反射, 产生驻波振荡, 从而形成谐振^[20]。

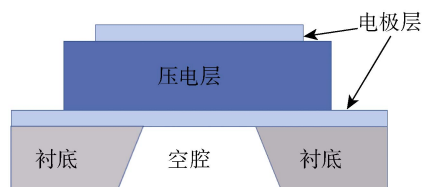


图 1 FBAR 结构

Fig.1 Structural diagram of FBAR

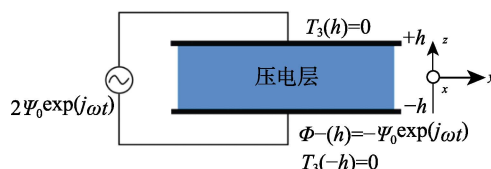


图 2 FBAR 原理

Fig.2 Schematic diagram of FBAR

理想的纵波模式 FBAR 声波沿厚度方向传播, 谐振频率主要由纵向尺寸即薄膜的厚度决定, 可近似表示为^[21]:

$$f_{n,T} = n[v_T / (2t)] \quad (1)$$

式中: n 表示谐振阶数, $n=1$ 对应基频谐振频率; v_T 为固体中纵波波速; t 为膜层厚度。

真实情况下, 电场还会激发平行于电极平面传播的横向振动模态, 其谐振频率主要由横向尺寸决定, 可大致表示为:

$$f_{n,L} = n[v_L / (2w)] \quad (2)$$

式中: v_L 是固体中声波横向传播速度; w 为电极横向尺寸。这种情况下横向模式会造成模态耦合干扰, 影响谐振器的性能, 这种横向模态的干扰表现为频响曲线上的寄生杂波。

由于 FBAR 谐振器横向尺寸宽度 w 远大于纵向尺寸厚度 t , 基频的横向模态不会和纵向模态耦合, 但横向的高阶谐振频率仍可能接近于纵波模式的基

频, 导致谐振器的性能恶化, 需要通过 FBAR 的结构设计来抑制寄生谐振的影响。

2 FBAR 有限元建模与仿真

2.1 FBAR 基本结构仿真分析

由于衬底结构对谐振器振动特性的影响较小, 且复杂结构的纯三维仿真计算量极大, 因此只对谐振器主体部分, 即包括电极层和压电层的三明治结构进行仿真分析。基本仿真结构中, 各层形状均为规则的正方形, 谐振区域面积主要由顶电极决定, 材料及尺寸见表 1, 上下电极为 Mo 材料, 压电层为 AlN 薄膜。

表 1 FBAR 各层的材料及尺寸
Tab.1 Materials and dimensions of FBAR layers

结构	材料	厚度/ μm	边长/ μm
顶电极	Mo	0.2	100
压电层	AlN	2	200
底电极	Mo	0.2	200

FBAR 谐振器的力-电耦合压电本构方程为:

$$T=c^E S - e_i E, D=e S + \epsilon^S E \quad (3)$$

式中: T 为应力; S 为应变; E 为电场强度; D 为电位移; c^E 为弹性矩阵; e 为压电耦合矩阵; e_i 为压电耦合矩阵的转置; ϵ^S 为介电常数矩阵。

谐振器力-电耦合仿真所需的 AlN 压电薄膜材料各系数矩阵如下:

$$c^E = \begin{bmatrix} 397 & 143 & 112 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 397 & 143 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 372 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 116 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 116 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 125 \end{bmatrix} \text{GPa} \quad (4)$$

$$e = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -0.58 \\ 0 & 0 & -0.58 \\ 0 & 0 & 1.55 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & -0.48 & 0 \\ -0.48 & 0 & 0 \end{bmatrix} \text{C} \cdot \text{m}^{-2} \quad (5)$$

$$\epsilon^S = \begin{bmatrix} 9.21 & 0 & 0 \\ 0 & 9.21 & 0 \\ 0 & 0 & 10.26 \end{bmatrix} \quad (6)$$

设置力学边界条件为四周固定, 电学边界条件为顶电极施加 1 V 电压, 底电极接地。在网格划分中, 由于 FBAR 各膜层的横纵尺寸相差较大, 兼顾计算量和精度的情况下, 采用结构化网格在厚度方向进行分层扫描以得到较为准确的仿真结果, 各膜层扫描单元数分别设置为 2、4、2。谐振器的三维网格模型如图 3 所示。

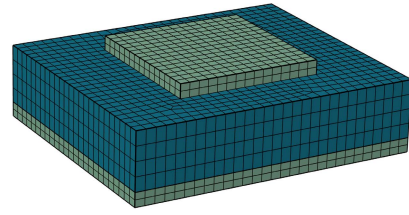


图 3 FBAR 谐振器基本结构的三维有限元网格模型
Fig.3 3D finite element mesh model of FBAR

基于多物理场仿真软件, FBAR 谐振器基本结构的导纳特性曲线如图 4 所示。图 4 中, 串联谐振频率 f_s 对应导纳最大值, 并联谐振频率 f_p 对应导纳最小值, 曲线上的寄生谐振峰表示模态耦合干扰的影响。由仿真结果可知, 该谐振器串联谐振频率为 1.727 GHz, 但是曲线存在明显的寄生杂波, 受到横向振动模态的耦合干扰较为严重。

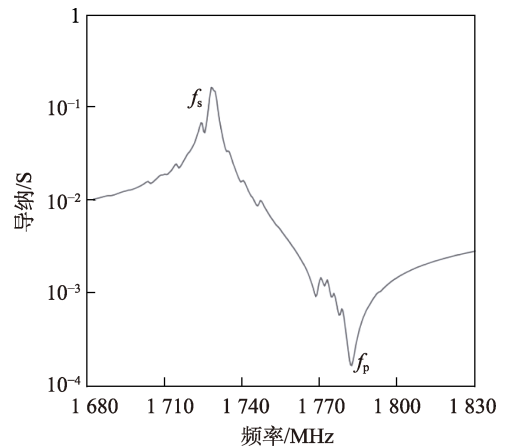


图 4 正方形电极导纳特性曲线
Fig.4 Admittance response of square electrode structure

2.2 电极结构对谐振器性能的影响仿真分析

为削弱寄生振动模态的影响, 需要对电极结构进行优化设计。采用和 2.1 节相同的几何参数和边界条件, 保持压电层和底电极不变, 同时保持顶电极面积固定为 0.01 mm^2 , 保持谐振区域面积一定, 只改变顶电极形状, 建立正方形、圆形和不规则四边形电极结构的三维谐振器仿真模型, 进行频率响应仿真分析, 如图 5 所示。

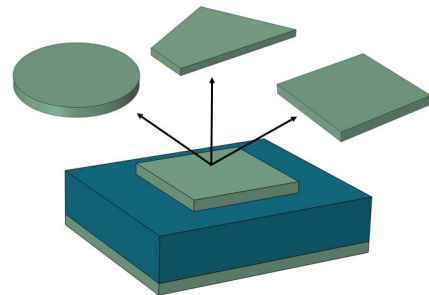


图 5 不同形状电极 FBAR 仿真模型
Fig.5 Structural diagram of FBAR with different shape electrodes

不同形状电极 FBAR 谐振器的导纳特性曲线对比如图 6 所示。可观察到不同形状电极结构中，谐振区域固定，质量负载未发生改变，故谐振频率无明显变化。普通正方形电极导纳曲线上杂波最为明显，受横向振动模态的干扰较强，而不规则四边形电极曲线最平滑，消除了明显的寄生谐振峰。这是由于正方形和圆形电极对边平行，横向振动最终会形成驻波，而不规则形状的上电极设计为非平行的边缘，增加横向振动模态声波的反射路径，导致寄生模式衰减，降低了其强度，使其不易与纵波模式耦合，达到削弱模式耦合干扰的目的。

三种电极结构谐振器在谐振频率点处的振动位移云图见图 7。由图 7 可直观地看出，谐振点处 FBAR 谐振器的振动幅值最大，谐振区域电极中心的位移形变最大，沿四周向外位移逐渐减小，非谐振区域衰减近似为 0。仿真结果表明，FBAR 的谐振区域由上下电极重叠部分决定，而且不同电极形状的 FBAR 中心

最大位移均在 $0.002 \mu\text{m}$ 左右，处于薄膜的许可应变范围内，验证了在谐振频率下器件结构的可行性。

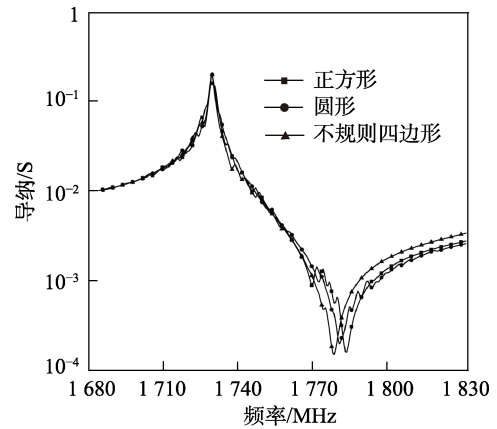


图 6 不同形状电极 FBAR 的导纳特性曲线
Fig.6 Admittance response of FBAR with different shape electrodes

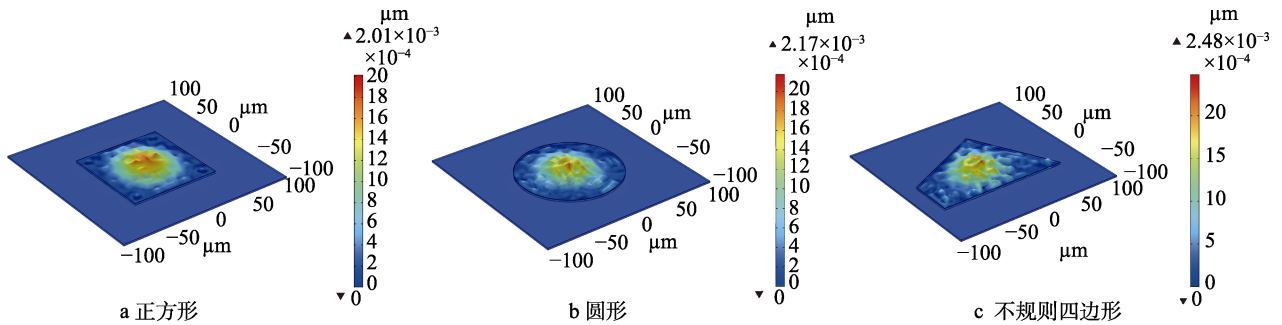


图 7 不同形状电极 FBAR 振动位移云图
Fig.7 Displacement nephogram of FBAR with different shape electrodes: a) square; b) circle; c) irregular quadrilateral

3 异形电极调控的谐振器改进结构

为进一步削弱 FBAR 寄生谐振的影响，在上述不规则四边形电极结构的基础上，通过加厚顶电极的边缘区域，即在上层 Mo 电极上增加不规则四边形框状 Mo 电极，得到异形电极结构的 FBAR 改进构型，使能量更好地限制在谐振区域。异形电极调控的改进构型如图 8 所示。进行参数化扫描的力-电多场耦合仿真计算，设置顶部框架厚度 t 和宽度 w 两组参数，谐振器横向尺寸远大于纵向尺寸，故厚度尺寸参数较宽度更为敏感，需适当设置参数区间及间隔。在厚度上设置 5 组参数， t 从 $0.05 \mu\text{m}$ 到 $0.25 \mu\text{m}$ ，间隔为

$0.05 \mu\text{m}$ ；在宽度上设置 6 组参数， w 从 $4 \mu\text{m}$ 到 $9 \mu\text{m}$ ，间隔为 $1 \mu\text{m}$ 。参数化扫描采用全部组合的方式，通过参数扫描仿真，从 30 组数据中计算得到的最优解是顶部框架厚度为 $0.1 \mu\text{m}$ ，宽度为 $6 \mu\text{m}$ 。

改进结构与其他结构的导纳曲线对比如图 9 所示。为得到不同结构的性能变化规律，选取最优解的异形电极、非最优解电极以及普通四边形电极结构进行对比。其中，最优异形电极 $w=6 \mu\text{m}$ ， $t=0.1 \mu\text{m}$ ；所选的非最优解电极 $w=8 \mu\text{m}$ ， $t=0.2 \mu\text{m}$ ；普通四边形电极 $w=0 \mu\text{m}$ ， $t=0 \mu\text{m}$ （无顶部附加结构）。由比较结果可知，优化后的异形电极调控的 FBAR 在不规则四边形电极优化的基础上，进一步削弱了寄生杂波，但宽度为 $8 \mu\text{m}$ 、厚度为 $0.2 \mu\text{m}$ 的非最优框状结构 FBAR 的频响曲线较优化结构的曲线特性更差，说明不合理的设计反而会加重寄生效应的不利影响。图 9 中谐振频率发生小幅度漂移，原因是顶部质量负载造成谐振频率减小。

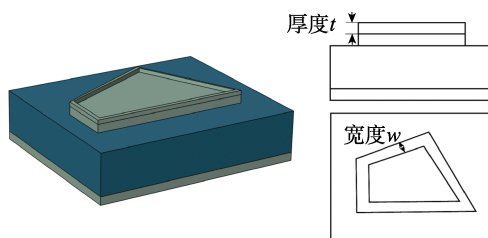


图 8 异形电极结构 FBAR 结构
Fig.8 Structure diagram of FBAR with the shaped electrode

异形电极与四边形电极的相位响应对比如图 10 所示。异形电极结构调控的 FBAR 通过结构优化消除了更多细小的杂波。图 10 相位曲线上的波纹可以更直观地反映 FBAR 耦合谐振的微弱影响。异形电极结

构 FBAR 的串并联谐振频率间的带内波纹更小, 相位曲线更为平滑。

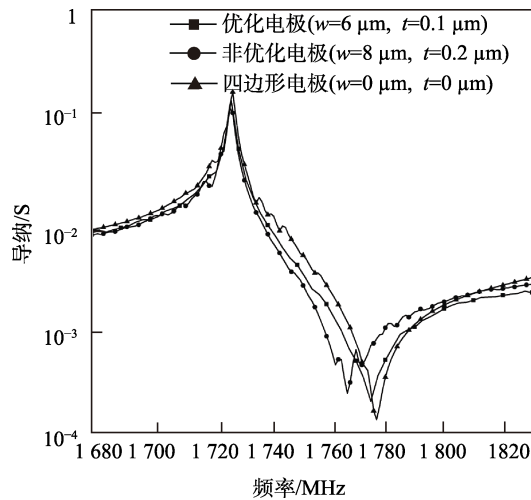


图 9 不同结构的频响曲线对比

Fig.9 Frequency response comparison of different structures

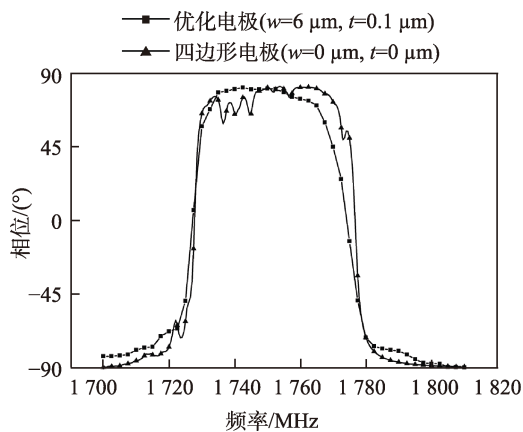


图 10 不规则四边形与异形结构 FBAR 相位图

Fig.10 Phase response between irregular quadrilateral and shaped structures

4 结论

1) 基于多物理场耦合仿真软件, 对不同电极结构的 FBAR 谐振器进行了影响规律研究, 仿真分析了不同电极形状结构对应的阻抗特性及寄生振动模式干扰的影响规律。仿真结果表明, 不规则形状电极结构的设计能增加横向振动模式声波的反射路径, 降低杂散横向模式的强度。

2) 通过增加电极边缘质量负载, 提出异形电极调控的 FBAR 改进结构, 并对敏感几何参数进行优化。力-电耦合多物理场仿真结果表明, 异形电极调控 FBAR 改进结构的导纳特性曲线更为平滑, 带内波纹减少, 无明显寄生谐振峰, 达到了削弱寄生谐振的目的。

3) 参数优化所得异形电极结构的框状电极宽度为

6 μm 、厚度为 0.1 μm , 谐振器的谐振频率为 1.727 GHz, 该结构能明显削弱寄生模式耦合干扰的不良影响。

参考文献:

- [1] JOHNSTON M L, KYMISSIS I, SHEPARD K L. FBAR-CMOS Oscillator Array for Mass-Sensing Applications[J]. IEEE Sensors Journal, 2010, 10(6): 1042-1047.
- [2] LOEBL H P, KLEE M, METZMACHER C, et al. Piezoelectric Thin AlN Films for Bulk Acoustic Wave (BAW) Resonators[J]. Materials Chemistry and Physics, 2003, 79(2-3): 143-146.
- [3] 徐学良, 陆玉姣, 杨柳, 等. 薄膜体声波滤波器的发展现状[J]. 压电与声光, 2017, 39(2): 163-166. XU Xue-liang, LU Yu-jiao, YANG Liu, et al. The State-of-the-Art of Film Bulk Acoustic Wave Resonators Filter[J]. Piezoelectrics & Acousto-optics, 2017, 39(2): 163-166.
- [4] GAO Jun-ning, LIU Guo-rong, LI Jie, et al. Recent Developments of Film Bulk Acoustic Resonators[J]. Functional Materials Letters, 2016, 9(3): 1630002.
- [5] SU Shu-jing, GENG Zi-hui, MA Xiao-xin, et al. A Film Bulk Acoustic Resonator Pressure Sensor Based on Lateral Field Excitation[J]. International Journal of Distributed Sensor Networks, 2018, 14(11): 155014771881434.
- [6] 周桐, 张志旭, 任万发, 等. 典型结构振动-加速度综合环境试验研究[J]. 装备环境工程, 2015, 12(5): 50-55. ZHOU Tong, ZHANG Zhi-xu, REN Wan-fa, et al. Experimental Research on Typical Structure under Vibration-Acceleration Combined Environment[J]. Equipment Environmental Engineering, 2015, 12(5): 50-55.
- [7] 张俊, 杜波, 徐园园, 等. 薄膜体声波滤波器加速寿命评估技术研究[J]. 装备环境工程, 2019, 16(7): 101-104. ZHANG Jun, DU Bo, XU Yuan-yuan, et al. Studying on Accelerated Life Assessment Technology of Film Bulk Acoustics Filter[J]. Equipment Environmental Engineering, 2019, 16(7): 101-104.
- [8] HE X L, GARCIA-GANCEDO L, JIN P C, et al. Film Bulk Acoustic Resonator Pressure Sensor with Self Temperature Reference[J]. Journal of Micromechanics and Microengineering, 2012, 22(12): 125005.
- [9] BIAN Xiao-lei, JIN Hao, WANG Xiao-zhi, et al. UV Sensing Using Film Bulk Acoustic Resonators Based on Au/n-ZnO/Piezoelectric-ZnO/Al Structure[J]. Scientific Reports, 2015, 5: 9123.
- [10] ALI W R, PRASAD M. Piezoelectric MEMS Based Acoustic Sensors: A Review[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2020, 301: 111756.
- [11] GARCÍA-GANCEDO L, PEDRÓS J, IBORRA E, et al. Direct Comparison of the Gravimetric Responsivities of ZnO-Based FBARs and SMRS[J]. Sensors and Actuators

- B: Chemical, 2013, 183: 136-143.
- [12] HARA M, YOKOYAMA T, UEDA M, et al. 12E-2 X-Band Filters Utilizing AlN Thin Film Bulk Acoustic Resonators[C]//2007 IEEE Ultrasonics Symposium Proceedings. New York: IEEE, 2007.
- [13] KAITILA J, YLILAMMI M, ELLA J, et al. Spurious Resonance Free Bulk Acoustic Wave Resonators[C]//IEEE Symposium on Ultrasonics, 2003. Honolulu: IEEE, 2003.
- [14] LAKIN K M, LAKIN K G. Numerical Analysis of Thin Film BAW Resonators[C]//IEEE Symposium on Ultrasonics, 2003. Honolulu: IEEE, 2003.
- [15] LIU Jing, DU Jian-ke, WANG Ji, et al. Thin Film Bulk Acoustic Wave Filters with Ring-Dot Electrodes[J]. Journal of Zhejiang University-SCIENCE A, 2018, 19(10): 786-795.
- [16] 高杨, 韩超, 许夏茜. 体声波滤波器的电磁-热耦合仿真方法[J]. 压电与声光, 2019, 41(5): 617-620.
GAO Yang, HAN Chao, XU Xia-xi. Electromagnetic-Thermal Coupled Simulation Method for Bulk Acoustic Wave Filter[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2019, 41(5): 617-620.
- [17] 韩超, 高杨, 张大鹏. 体声波谐振器热行为仿真[J]. 压电与声光, 2018, 40(4): 507-510.
HAN Chao, GAO Yang, ZHANG Da-peng. Thermal Behavior Simulation of Bulk Acoustic Wave Resonator [J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2018, 40(4): 507-510.
- [18] LEE J H, YAO C M, TZENG K Y, et al. Optimization of Frame-Like Film Bulk Acoustic Resonators for Suppression of Spurious Lateral Modes Using Finite Element Method[C]//IEEE Ultrasonics Symposium, 2004. Montreal: IEEE, 2004.
- [19] PALIWAL N, MUKHIJA N, BHATIA D. Design and Optimization of High Quality Factor MEMS Piezoelectric Resonator with Pseudo Electrodes[C]//2015 4th International Conference on Reliability, Infocom Technologies and Optimization (ICRITO) (Trends and Future Directions). Noida: IEEE, 2015.
- [20] 福学, 王丽坤. 现代压电学 [M]. 北京: 科学出版社, 2001.
ZHANG Fu-xue, WANG Li-kun. Modern Piezoelectricity [M]. Beijing: Science Press, 2001.
- [21] ROSÉN D, BJURSTRÖM J, KATARDJIEV I. Suppression of Spurious Lateral Modes in Thickness-Excited FBAR Resonators[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2005, 52(7): 1189-1192.

责任编辑: 刘世忠