文章编号:1004-2474(2024)05-0675-05 **DOI**:10.11977/j.issn.1004-2474.2024.05.010

一种适用于窄带滤波器的新型谐振器结构

陈思艺[1],徐宇彤[1],李 念[2],陈 峰[1]
(1.苏州大学 机电工程学院,江苏 苏州 215021;2.苏州汉天下电子有限公司,江苏 苏州 215124)

摘 要:滤波器作为信号传输过程中的关键器件,具有筛选、过滤传输信号的作用。提出了一种适用于窄带滤波器的新型谐振器结构,通过堆叠 c 轴取向相反的异质压电薄膜,削弱机电耦合效应,从而降低谐振器的有效带宽。首先阐述了新型窄带谐振器结构的工作原理,再对传统 Mason 电路模型进行修正,采用分段式四端口传输线及双变压器模型进行建模,使其适用于所提出的谐振器结构,同时将电路仿真与有限元仿真的结果进行对比,以验证电路模型的准确性。采用常见的阶梯型拓扑构造了窄带滤波器的原理电路,通过仿真得到滤波器的传输特性曲线,论证了窄带滤波的可行性。

关键词:谐振器;滤波器;窄带;等效电路;有限元仿真
中图分类号:TN384;TN713 **文献标识码**:A

A Novel Resonator Structure Suitable for Narrowband Filter

CHEN Siyi[1], XU Yutong[1], LI Nian[2], CHEN Feng[1]
(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Soochow University, Suzhou 215021, China;
2. Suzhou HunterSun Electronics Co., Ltd. Suzhou 215124, China)

Abstract: Filters are essential components in the signal transmission process, serving to screen and filter transmitted signals. In this paper, we propose a novel resonator structure designed for narrow-band filters. The electromechanical coupling coefficient is reduced by stacking heterogeneous piezoelectric films with oppositely oriented c-axes. First, the fundamental principle of the new narrow-band resonator structure is explained through finite element simulations. Furthermore, the traditional Mason circuit model is modified to account for the structure of the proposed resonator. Two transformers associated with four-port transmission lines are employed for the electrical modeling. A comparison of circuit simulation and finite element simulation results is presented to verify the accuracy of the equivalent circuit model. Finally, a basic narrow-band filter is constructed using the widely recognized ladder-type topology. The transmission characteristics of the filter are obtained through simulation, confirming the reliability of the narrow-band filter design.

Key words: resonator; filter; narrow-band; equivalent circuit; finite element modeling

0 引言

滤波器在移动手机、智能电器、通讯基站、卫星、雷达、导航等领域具有重要作用,主要功能是对具有不同频率的无线通信信号进行选择,筛选有用信号,过滤干扰信号[1]。根据基本工作原理进行划分,滤波器可分为 LC 滤波器、腔体滤波器、陶瓷滤波器以及应用最广泛的压电声学滤波器[2]。压电声学滤波器的核心组成元件是采用压电材料制成的谐振器。按照不同工作模态的声波类型,谐振器分为声表面波谐振器(SAW)、体声波谐振器(BAW)。BAW 因具有高功率容量、高品质因数(Q 值)、工艺兼容性好等优势,故而更加适用于高频通信波段[3]。

已有研究表明,通过对压电材料进行稀有金属掺杂,能显著增加 BAW 的有效带宽,降低滤波器的制造成本和设计难度。结合电容、电感、电阻等集总元件,目前滤波器产品已渐趋成熟,性能基本能够满足不同场景的应用需求[4]。而在信号传输中存在某些工作带宽很窄的应用场景,即窄带滤波,如 GPS 导航的常见波段,其工作带宽一般小于 20 MHz。

收稿日期:2024-05-23
基金项目:国家自然科学基金资助项目(12102183)
作者简介:陈思艺(2004-),女,江苏省扬州市人。通信作者:陈峰(1990-),男,江苏省扬州市人,博士。

由于市场份额相对较小，窄带（或超窄带）滤波器的关注度远低于常规带宽的滤波器。近年来，随着滤波器相关研究的推进、产业的发展，更多学者陆续提出了基于不同原理的窄带滤波器实施方案，包括微带线型[5]、腔体滤波器型[6]、声表面波型[7]、薄膜体声波谐振器型[8]以及基于周期性结构的声子晶体型[9]等。

针对窄带滤波器提出了一种新型谐振器结构，通过堆叠 c 轴取向相反的压电薄膜以削弱压电材料的机电耦合效应，从而降低谐振器的有效带宽。通过有限元仿真解释了新型结构的基本工作原理，并在电路仿真软件中建立了新型谐振器结构的等效电路模型。通过对比电路仿真与有限元仿真的结果，证明了电路模型的准确性。同时，改变压电叠层的厚度参数并进行仿真分析，总结了新型窄带谐振器的带宽变化规律。所提出的新型谐振器结构采用典型的阶梯型滤波器拓扑电路，通过仿真给出了窄带滤波器的传输特性曲线，验证了新型谐振器结构的可行性。

1 窄带宽谐振器基本构型

谐振器的基本工作原理是压电材料力电耦合效应，线性压电方程是分析压电材料的经典方法：

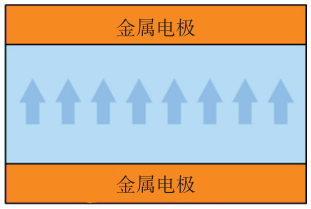
$$\begin{aligned} T&=cS+eE \\ D&=eS-\varepsilon E \end{aligned} \tag{1}$$

式中：T、D 分别表示应力和电位移；S、E 分别为应变和电场；c、e、ε 分别为压电材料的刚度系数、压电耦合系数、介电常数。这些参数与压电材料的 c 轴方向密切相关。根据 Bond 矩阵[10]，当 c 轴反向时，压电材料的材料参数与原始参数的关系为

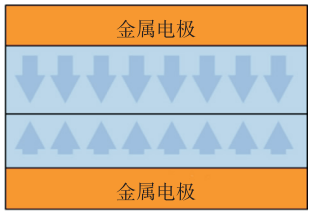
$$c^i=c,e^i=-e,\varepsilon^i=\varepsilon \tag{2}$$

式中上标 i 表示 c 轴反向层。

根据式(2)可知，c 轴反向压电薄膜刚度系数、介电常数与原有参数一致，代表机电耦合效应的压电系数矩阵与原始参数互为相反数。因此，通过堆叠 c 轴取向相反的异质压电薄膜可以削弱谐振器的有效机电耦合系数，降低带宽，同时不影响其声学、电学（主要指谐振器的容性工作区域）的性能表现，便于进行滤波器的电路设计。针对窄带滤波器提出了一种新型谐振器结构，如图 1 所示，图中箭头表示压电材料的 c 轴方向。



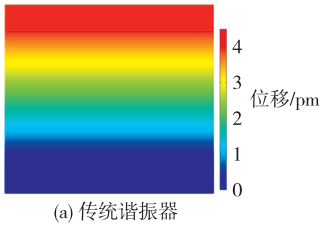
(a) 传统三明治结构



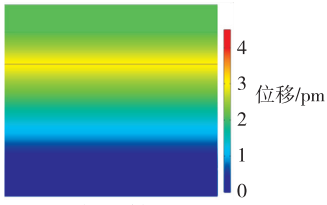
(b) 本文提出的c轴反向异质结构

图 1 谐振器结构示意图

图 2 给出了 c 轴反向异质结构的有限元仿真结果。由图可见，在 1 V 电压激励下，所提出的新型谐振器（即 c 轴反向异质结构）的上下表面位移差值远小于传统压电谐振器，证明了这种新型谐振器的结构能削弱压电效应，可应用于窄带滤波器设计。另一方面，窄带应用时，器件的工作功率通常较高，因此，谐振器的功率容量及相应的温度效应需要重点关注。由图可见，在相同的外加电压激励下，在谐振器的整个厚度范围内，该新型谐振器的机械振动幅度远小于传统谐振器，而由机械振动损耗引起的器件发热情况明显低于传统谐振器。在此基础上，在滤波器设计时仍可结合常见的提升 FBAR 滤波器功率容量的方法对窄带滤波器的功率容量进行进一步提升，如二氧化硅温度补偿层[11]、谐振器串/并联拆分[12]等。



(a) 传统谐振器



(b) 新型谐振器

图 2 1 V 电压激励时的有限元仿真结果

2　窄带宽谐振器的等效电路模型

等效电路模型是滤波器电路设计的必备分析工具,属于一种集总参数的分析方法。体声波谐振器的等效电路模型主要分为两类:一种是由谐振器频率响应特性得到的唯象模型,称为 BVD 模型;另一种是基于基本压电方程,通过一维近似及电压电流关系推导得到的模型,称为 Mason 模型。本文选择第二种方法进行电路建模。

为了建立适用于本文提出的 c 轴反向异质结构谐振器的等效电路模型,对传统的 Mason 模型[13]进行修正,具体方法如图 3 所示。传统 Mason 模型中,声学回路采用理想传输线进行模拟,电学回路采用虚拟电容进行模拟,再利用虚拟的变压器描述压电材料的力电转换效应,连接声学回路与电学回路。本文采用了与之相似的建模方式,不同之处在于:对压电层进行分段,用于模拟 c 轴反向结构,采用理想四端口传输线模型进行模拟;同时根据式(2)-(4),针对两层异质压电薄膜,为变压器设置互为相反数的转换系数。

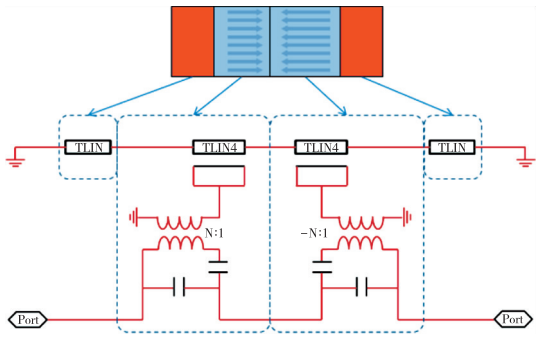


图 3　修正等效电路模型图

3　窄带宽谐振器电路仿真

为验证等效电路模型的准确性,首先将电路模型的仿真结果与有限元计算结果进行对比。仿真过程中,谐振器设置为理想的 Mo-AlN-Mo 的三明治结构,其中 AlN 压电层按照所提出的新型结构进行相应的替换。各层材料的材料参数可参考文献[14]。在真实的谐振器叠层结构中,由于工艺方面的需求可能会包含种子层(seed layer)、钝化层(passivation layer)等,其厚度相对较薄,对谐振器的振动特性影响相对较小。

在有限元软件中,参考图 1(b)的谐振器结构模型,建立压电器件的多物理场耦合模型,设置频域扫描进行仿真,仿真曲线如图 4 所示。有限元模型针对实体结构进行建模,描述的是真实器件的振动情况,导纳曲线中存在因横向边界引起的寄生效应、多模态耦合效应。而等效电路模型是一种理想状态下的一维近似理论,其主要优势在于系统级仿真分析的效率。但是寄生效应、耦合效应产生的杂波会对滤波器的传输特性产生干扰,目前通常采用不规则电极、电极微结构设计等方式进行抑制[15]。在不考虑杂波干扰的情况下,有限元仿真结果与电路仿真结果具有很好的一致性,证明本文建立的等效电路模型准确可靠。

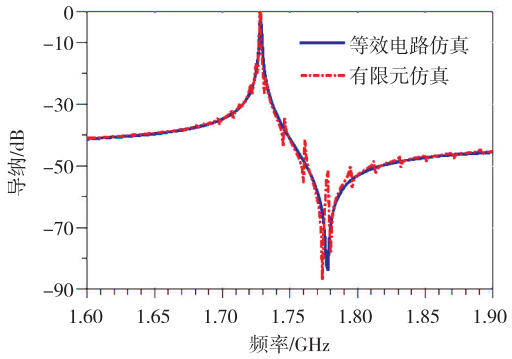


图 4　谐振器导纳仿真结果

图 5 给出了结构尺寸变化对谐振器有效带宽的影响。为便于分析,定义 c 轴正向压电层与 c 轴反向压电层的厚度比为

$$r=t_{c-}/t_{c+} \tag{3}$$

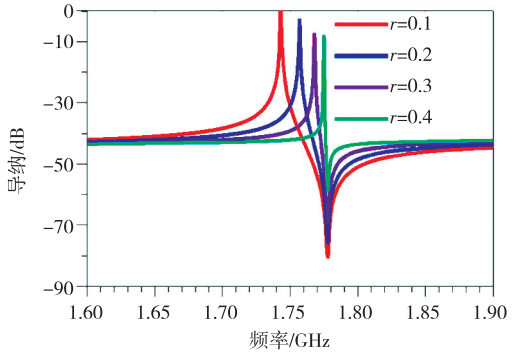


图 5　厚度比对谐振器带宽的影响

由图 5 可知,c 轴取向相反的压电层厚度越相近($r\to0.5$),则谐振器的串联谐振频率(导纳最高点)与并联谐振频率(导纳最低点)的差值越小。根据谐振器的有效机电耦合系数计算公式[15]:

$$k_{\mathrm{eff}}^2=\frac{\pi^2}{4}\cdot\frac{f_{\mathrm{p}}-f_{\mathrm{s}}}{f_{\mathrm{s}}} \tag{4}$$

经计算得到的谐振器有效带宽如表 1 所示。

表 1 新型 c 轴反向谐振器机电耦合系数

r	f_s/GHz	f_p/GHz	k_{eff}^2/%
0.1	1.743	1.778	4.95
0.2	1.757	1.778	2.95
0.3	1.768	1.778	1.40
0.4	1.775	1.778	0.42

由表 1 可知，r 趋近于 0.5 时，谐振器的有效机电耦合系数得到削弱，相对带宽随之降低。但压电效应的削弱意味着谐振器的能量利用率降低，必然导致谐振器的等效串联、并联电阻增大，从而影响谐振器的 Q 值以及滤波器的滚降效果。因此，在滤波器设计阶段应考虑根据具体的应用需求选择合适厚度比的谐振器进行产品设计。图 5 中，当 $r\to0$ 时，c 轴反向的压电层厚度占比很小，此时可退化为传统的体声波谐振器，导纳特性也近似于传统谐振器。

4 阶梯型拓扑窄带滤波器

典型的阶梯型拓扑带通滤波器由串联谐振器和并联谐振器构成，其基本原理如图 6 所示。其中，并联谐振器的谐振频率略低于串联谐振器，在实际产品中，通过在顶电极表面额外沉积质量负载层的方式实现频率调节。图中，f_{sp} 表示并联谐振器的串联谐振频率，在此频率下，并联谐振器导纳处于最大值，可近似为短路，流过滤波器的传输信号经由并联谐振器的短路效应进入地级，不再往输出端传输，形成滤波器的左侧传输零点；f_{ps} 表示串联谐振器的并联谐振频率，在此频率下，串联谐振器的导纳取得最小值，近似为开路，流过滤波器的传输信号被开路效应阻断，无法继续向输出端传输，形成右侧传输零点。

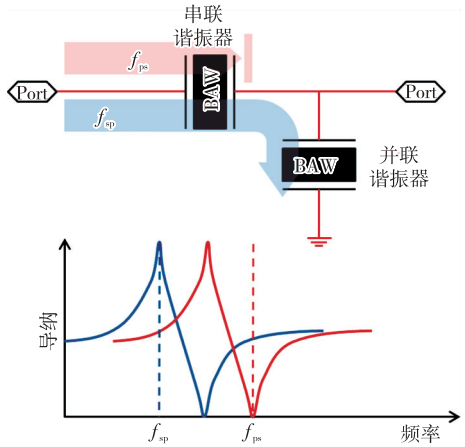


图 6 阶梯型拓扑带通滤波器原理图

根据阶梯型拓扑滤波器的工作原理，采用所提出的新型谐振器进行窄带滤波器的仿真验证。并联谐振器通过增加顶电极质量负载的方式来调整谐振器的工作频率，与阶梯型拓扑滤波器对应。在实际应用中也可通过设计串、并联谐振器具有不同压电层厚度比的方式来实现滤波，增加滤波器电路设计的灵活性。

滤波器的传输特性仿真结果如图 7 所示。在通带范围内（中心频率约为 1.73 GHz），频率信号能以较低的衰减系数通过滤波器，而在通带范围外，滤波器衰减系数较大，传输信号被滤波器阻断，形成窄带滤波。需要指出的是，该结果仅为说明新型谐振器结构在窄带滤波方面的可行性，滤波器的传输性能远未达到实际应用需求，存在诸如通带插入损耗较大、矩形系数较差、带外抑制较差等问题，在产品设计过程中仍需借助其他方法，结合先进的计算机辅助设计软件进行优化，如增加阶梯型拓扑滤波器阶数、引入电容电感、优化谐振器的面积比等现代滤波器的常用设计方法。

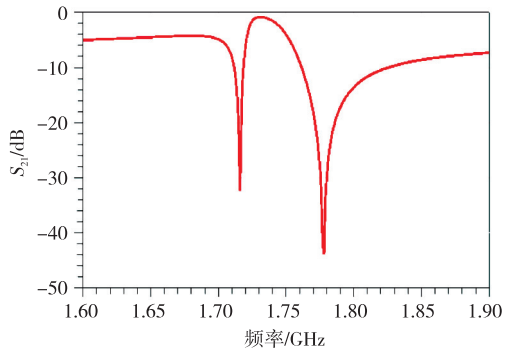


图 7 滤波器传输特性曲线的仿真结果

5 结论

1）提出了一种新型谐振器结构，即窄带宽谐振器。通过堆叠 c 轴反向异质压电薄膜削弱压电效应，降低谐振器的有效带宽，为窄带滤波器的设计提供基本元件方面的支持。

2）建立了适用于该新型窄带谐振器结构的等效电路模型，与有限元仿真结果的对比验证了模型的准确性，为滤波器设计提供了模型基础。

3）根据新型谐振器结构，借助等效电路模型构造了基本的阶梯形拓扑滤波器，对滤波器的传输特性进行仿真，验证了窄带滤波的可行性。

参考文献：

[1] HAGELAUER A, RUBY R, INOUE S, et al. From

microwave acoustic filters to millimeter-wave operation and new applications[J]. IEEE Journal of Microwaves, 2023, 3(1): 484-508.

[2] RUBY R. A snapshot in time: the future in filters for cell phones[J]. Microwave Magazine IEEE, 2015, 16(7): 46-59.

[3] KIRKENDALL C, IVIRA B. A fast thermo-piezoelectric finite element model of 3D transient FBAR dynamics under large RF signal[C]// Kobe, Japan: 2018 IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS), IEEE,2018.

[4] 陈鹏光, 王瑞, 马琨,等. 薄膜体声波谐振器的研究与仿真[J]. 压电与声光, 2019, 41(3): 378-382.
CHEN Pengguang, WANG Rui, MA Kun, et al. Study and simulation of film bulk acoustic resonator[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2019, 41(3): 378-382.

[5] XU K, LI D, JIANG Y. Narrow-band bandpass filter with very wide upper stopband[J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2020,62(11):3380-3384.

[6] 李瑞涛,杨青慧,张怀武. 一种宽阻带窄带腔体滤波器的设计[J]. 压电与声光, 2020, 42(1): 1-3.
LI Ruitao, YANG Qinghui, ZHANG Huaiwu. Design of a narrowband cavity filter with wide attenuation band[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2020, 42(1): 1-3.

[7] 段斌. 卫星通信用极窄带声表面波滤波器研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2019.
DUAN Bin. Research on the extreme-narrow-band SAW filter for satellite communication[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019.

[8] 周斌, 高杨, 何移,等. 窄带 FBAR 带通滤波器设计[J]. 微纳电子技术, 2013, 50(8): 487-493.
ZHOU Bin, GAO Yang, HE Yi, et al. Design of a narrow band FBAR band-pass filter[J]. Micronanoelectronic Technology, 2013, 50(8): 487-493.

[9] ZHANG Xiaopeng, LI Yan, WANG Yaguang, et al. Narrow-band filter design of phononic crystals with periodic point defects via topology optimization[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2021, 212(15): 106829.

[10] QIN Lifeng, CHEN Qingming, CHENG Hongbin, et al. Analytical study of dual-mode thin film bulk acoustic resonators (FBARs) based on ZnO and AlN films with tilted *c*-axis orientation[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics and Frequency Control, 2010, 57(8):1840-53.

[11] IVIRA B, FILLIT R Y, NDAGIJIMANA F, et al. Self-heating study of bulk acoustic wave resonators under high RF power[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2008, 55(1): 139-146.

[12] CHAUHAN V, HUCK C, FRANK A, et al. Enhancing RF bulk acoustic wave devices: Multiphysical modeling and performance[J]. IEEE Microwave Magazine, 2019,20(10): 56-70.

[13] HASHIMOTO K Y. RF bulk acoustic wave filters for communications[M]. London, UK: Artech House,2009.

[14] 张玲玲,刘梦伟,李鉴,等. 薄膜体声波谐振器横向杂散模式三维仿真分析[J]. 压电与声光, 2017, 39(3): 327-330.
ZHANG Lingling, LIU Mengwei, LI Jian, et al. 3D simulation of the spurious lateral modes of FBAR[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics,2017,39(3):327-330.

[15] AULD B A. Acoustic fields and waves in solids, Vols. Ⅰ and Ⅱ[M]. New Jersey, USA: John Wiley & Sons, Inc.,1973.