

空腔型薄膜体声波滤波器的关键技术进展

陶桂龙^{1,2}, 支国伟², 罗添友², 欧阳佩东², 衣新燕³, 李国强^{1,2,3}

(1. 华南理工大学 集成电路学院, 广州 511442; 2. 华南理工大学 发光材料与器件国家重点实验室, 广州 510640; 3. 广州市艾佛光通科技有限公司, 广州 510700)

摘要: 随着通信技术升级以及 5G 通信应用的驱动, 各种智能设备所需的滤波器数量激增, 促进了滤波器市场的繁荣, 但对其性能要求也越来越高, 例如大带宽、高频率、高功率容量、微型化、集成化以及低成本等指标是学术界与产业界重点关注的方向, 而基于薄膜体声波谐振器(Thin Film Bulk Acoustic Resonator, FBAR)技术的 FBAR 滤波器已成为最有前景的滤波器之一。另外, 当前空腔型 FBAR 滤波器已取得了一定的商业成功, 但是仍面临性能不足、工艺复杂、成本略高、技术受限等困境。为此, 本文试图从器件理论研究与结构优化、高性能压电材料制备与优化、新型工艺开发及技术融合三方面对 FBAR 滤波器的相关问题与关键技术进行综述, 旨在为该研究领域的学者梳理 FBAR 滤波器技术进阶与迭代的脉络, 以期在未来研究的路径与方向提供若干启发性思考。

关键词: FBAR 滤波器; 理论研究; AIN 压电薄膜; 技术融合; 综述

中图分类号: TN713 文献标志码: A 文章编号: 1000-324X(2025)02-0128-17

Progress on Key Technologies of Cavity-structured Thin Film Bulk Acoustic Wave Filter

TAO Guilong^{1,2}, ZHI Guowei², LUO Tianyou², OUYANG Peidong², YI Xinyan³, LI Guoqiang^{1,2,3}

(1. School of Integrated Circuits, South China University of Technology, Guangzhou 511442, China; 2. State Key Laboratory of Luminescent Materials and Devices, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China; 3. Guangzhou FLCT Communication Technology Co., Ltd., Guangzhou 510700, China)

Abstract: With upgrading of communication technology and driving of 5G communication applications, the explosive number of filters required by various smart devices promoted prosperity of the filter market. However, the demanded performance also becomes increasingly stringent, including broad bandwidth, high frequency, high power capacity, miniaturization, integration, and low cost, in both academia and industry. To meet these strict requirements, the thin film bulk acoustic resonator (FBAR) filters have emerged as one of the most promising types of filters with commercial success. But currently they are still facing difficulties such as insufficient performance, complex fabrication process, relatively higher cost, and technological constraints. This paper reviews the relevant issues and key technologies in FBAR filters in three aspects: theoretical research on devices and structural optimization, preparation and optimization of high-performance piezoelectric materials, and development of novel processes and

收稿日期: 2024-07-27; 收到修改稿日期: 2024-09-12; 网络出版日期: 2024-11-25

基金项目: 国家重点研发计划(2022YFB3604500, 2022YFB3604501)

National Key Research and Development Program of China (2022YFB3604500, 2022YFB3604501)

作者简介: 陶桂龙(1988–), 男, 博士研究生. E-mail: ictgl@mail.scut.edu.cn

TAO Guilong (1988–), male, PhD candidate. E-mail: ictgl@mail.scut.edu.cn

通信作者: 李国强, 教授. E-mail: msgli@scut.edu.cn

LI Guoqiang, professor. E-mail: msgli@scut.edu.cn

technological integration. The purpose of this paper is to delineate the trajectory of technological advancements and iterations in FBAR filters for scholars in the research field, with the expectation of providing several considerations for future research directions and pathways.

Key words: FBAR filter; theoretical research; AlN piezoelectric film; technology integration; review

随着通信技术的发展以及系统的微型化和信息功能的集成化,近年来,手机等智能终端所需支持的工作频段和通信频带日益增宽,导致系统对滤波器性能的要求越来越高,设备所需的滤波器数量呈爆发式增长。例如,当前的智能手机普遍支持 2G/3G/4G/5G 通信,同时还配备 Wi-Fi、蓝牙、GPS 定位、数据监测、近场通信等功能模块,而不同功能所使用的频谱往往并不相同,故实现这些功能需大量滤波器支撑^[1-2]。另外,伴随着多输入、多输出和载波聚合技术的发展,滤波器最好以双工器或多工器的形式进行布局构造^[3-4]。而在通信技术持续迭代更新的历程中,宝贵的设备空间促使智能终端等对滤波器的集成性以及体积提出了更苛刻的要求,必须对其体积进行缩微才能满足消费者对微型化、轻薄化智能设备的追求^[5]。此外,低插损、大带宽、高频率、高功率容量、微型化、集成化以及低成本等指标也已成为业界对射频滤波器的殷切期盼^[6]。而声学滤波器正是应对上述挑战与多维度要求的一个较有潜力的理想解决方案。目前射频前端领域所采用的声学滤波器主要包括声表面波 (Surface Acoustic Wave, SAW) 滤波器和体声波 (Bulk Acoustic Wave, BAW) 滤波器,两者特性和适用频段等如表 1 所示。其中,BAW 滤波器不仅兼具 SAW 滤波器的紧凑尺寸与介质滤波器的优良性能等特点,还具备高频率且与传统半导体集成电路(Integrated Circuit, IC)工艺兼容等优势,非常适用于 2.5 GHz 以上的频率,故被业界认为是最有可能实现模块集成化的滤波器。

BAW 滤波器又可分为 FBAR 滤波器以及基于

固态装配型谐振器(Solidly Mounted Resonator, SMR)技术的 SMR-BAW 滤波器。相对 SMR-BAW 滤波器而言,FBAR 滤波器品质因素更高、声学隔离效果更佳,且其制造工艺更易控制并具有良好的批量生产适应性等优势,故 FBAR 滤波器逐渐成为市场的主流选择。因此,当前 FBAR 滤波器作为移动终端射频滤波器领域的研究热点之一,高性能 FBAR 滤波器的设计与制备受到了各国研究人员的广泛关注和重视。

1 FBAR 滤波器的机理

1.1 FBAR 滤波器的工作机理及拓扑结构

FBAR 滤波器是一款利用压电薄膜在厚度方向上的声学谐振而实现电学选频的器件,将基本构成单元 FBAR 按特定电路拓扑结构级联之后便可构成。其中 FBAR 的电学特性如图 1(a)所示,在不同频率的输入信号作用下,其表现出不同的电学特征。当信号频率 $f = f_s$ 时,FBAR 发生串联谐振,阻抗呈极小值;当信号频率 $f = f_p$ 时,FBAR 发生并联谐振,阻抗呈极大值。受限于半导体 IC 工艺制程等因素,并考虑在晶圆上的集成化、可制造性、生产良率等原因,当前实用的 FBAR 滤波器在拓扑结构上广泛采取了梯形结构的级联形式,而 L 型结构是梯形滤波器中最基础的单元之一,如图 1(b)所示,其中横向与纵向器件分别称为串联 FBAR、并联 FBAR,其传输特性如图 1(c)所示。

在图 1(b)所示的 FBAR 滤波器中,设串联 FBAR 的串/并联谐振频率分别为 f_s^s 、 f_p^s , 并联

表 1 SAW 滤波器和 BAW 滤波器的技术特点
Table 1 Technical characteristics of SAW filter and BAW filter

Filter type	SAW filter	BAW filter
Characteristic	High stability, low insertion loss (2–4 dB)	High stability, low insertion loss (0.8–1.5 dB), high power tolerance
Applicable frequency range	10 MHz–3 GHz	1.5–6 GHz, the maximum up to over 10 GHz
Advantage	Smaller than the traditional ceramic filter, flexible, mature technology, high reliability	Suitable for high frequency, insensitive to temperature changes, miniaturized vertical propagation in acoustic wave, decreased size according to frequency increase
Limitation	Poor thermal stability, decreased Q-value when operating frequency exceeds 1.5 GHz	High manufacturing cost, complex manufacturing process

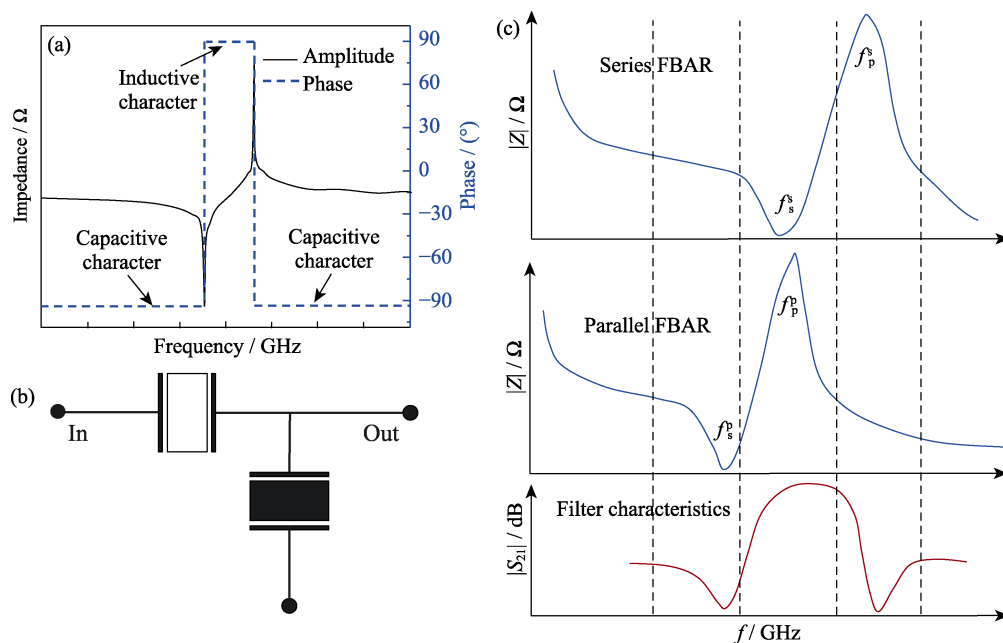


图 1 基于 L 型结构的 FBAR 滤波器的工作原理

Fig. 1 Operating principle of the L-type FBAR filter

(a) Electrical characteristics of the idealized FBAR; (b) Fundamental unit of the L-type structure; (c) Transmission response

FBAR 的串/并联谐振频率分别为 f_s^p 、 f_p^p 。在实际制备 FBAR 滤波器时, 串/并联 FBAR 的结构一般相同, 但会通过一些工艺使两器件在电极面积等方面有细微差异, 以形成不同的谐振频率, 且后者的谐振频率低于前者, 理想状态下制备的器件中应有 $f_s^s = f_p^p$ 。基于理想情况, L 型 FBAR 滤波器的工作原理如下: 当输入信号 $f = f_p^p$ 时, 串联 FBAR 的阻抗呈容抗但数值较小, 并联 FBAR 的阻抗呈极小值, 可类比为短路, 此时信号通过串联 FBAR 但被并联 FBAR 短接入地而滤除; 当输入信号 $f = f_s^s = f_p^p$ 时, 串联 FBAR 的阻抗呈极小值, 并联 FBAR 的阻抗呈极大值, 可类比为串联 FBAR 短路, 并联 FBAR 断路, 则该信号通过滤波器; 当输入信号 $f = f_s^s$ 时, 串联 FBAR 阻抗呈极大值, 可类比为断路, 并联 FBAR 阻抗呈容抗但数值较小, 就算有信号分量通过串联 FBAR 泄漏也会被并联 FBAR 再次过滤。此外, FBAR 滤波器常用的基础单元还有 T 型/ π 型结构。根据工艺制程以及不同的应用需求与性能指标, 常将若干 L 型/T 型/ π 型结构通过不同形式的级联而构成所需滤波器。但要实现一款真正实用的滤波器则需对系统的整体性能指标进行全面考量以及综合分析, 并在不同性能需求之间做出合理权衡, 故其拓扑网络的构建过程必将更为复杂。

1.2 FBAR 的电路模型与数学分析

1.2.1 FBAR 的等效电路模型及数学表示

FBAR 的原理性结构如图 2(a)所示, 其核心是顶电极/压电薄膜/底电极组成的复合叠层结构。为提升 FBAR 滤波器的性能, 可从 FBAR 的等效电路模型进行数学分析。理想情况下, FBAR 中压电薄膜的 Mason 等效电路模型如图 2(b)所示, 其电学阻抗特性如公式(1)^[7]所示。

$$Z = \frac{1}{j\omega C_0} \left[1 - k_t^2 \cdot \frac{\tan \theta}{\theta} \cdot \frac{(Z_t + Z_b) \cos^2 \theta + j \sin 2\theta}{(Z_t + Z_b) \cos 2\theta + j(Z_t Z_b + 1) \sin 2\theta} \right] \quad (1)$$

为便于理解图 2(b)所示的电路模型, 对公式(1)进行适当的数学等效变换, 可得其等价形式:

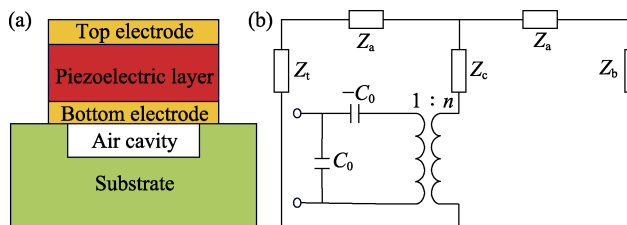


图 2 FBAR 与压电薄膜的等效电路模型

Fig. 2 FBAR and the equivalent circuit model of piezoelectric thin film

(a) Schematic structure of FBAR; (b) Mason equivalent circuit model of the piezoelectric thin film

$$Z = \frac{1}{j\omega C_0 + \frac{1}{-\frac{1}{j\omega C_0} + n^2 \left(-jZ_p \csc 2\theta + \frac{1}{\frac{1}{jZ_p \tan \theta + Z_t} + \frac{1}{jZ_p \tan \theta + Z_b}} \right)}} \quad (2)$$

式中, ω 为信号的角频率; C_0 为 FBAR 的静态电容, $C_0 = \varepsilon_{zz}^S \cdot A / 2h$, 其由材料的夹持介电常数 ε_{zz}^S 、FBAR 的有源区面积 A 、压电薄膜的厚度 h 共同决定; n 为简化系数, 可理解为图 2(b) 中变压器线圈的匝数, $n^2 = 2\theta / k_t^2 \omega C_0 Z_p$, 其由声波在传播时产生的相位角 θ 、压电薄膜的本征机电耦合系数 k_t^2 、 ω 、 C_0 和压电薄膜的特征声学阻抗 Z_p 求得;

$\theta = \omega / v_a = \omega h / \sqrt{\frac{c_{33}^E + e_{23}^2 / \varepsilon_{zz}^S}{\rho}}$, v_a 为材料的纵波声速, c_{33}^E 为材料的弹性劲度常数, e_{23}^2 为材料的压电应力常数, ρ 为材料的密度; $Z_p = \sqrt{\rho(c_{33}^E + e_{23}^2 / \varepsilon_{zz}^S)}$; Z_t 为从压电薄膜上表面往上看归一化声学阻抗; Z_b 为从压电薄膜下表面往下看归一化声学阻抗。此外, 在图 2(b) 中 $Z_a = jZ_p \tan \theta$, $Z_c = -jZ_p \csc 2\theta$ 。

事实上, 实用的 FBAR 是基于图 2(a) 所示的原理性结构进行优化而得到的一个具有复合叠层结构的器件, 其整个叠层结构除压电薄膜与顶/底电极之外, 还有温补层、调频层等其他结构层。声波将在除压电薄膜层之外的其他结构层中传播, 但这些其他结构层不具备压电效应, 其等效电路模型中不包含电学支路与机电耦合项, 故实际的 FBAR 的 Mason 等效电路模型是以图 2(b) 所示模型为基础的一个更复杂的模型, 其 Z_t 、 Z_b 涉及各叠层的材料参数, 而这些材料参数都会影响 FBAR 的综合性能。

1.2.2 表征 FBAR 性能的关键指标

频率是 FBAR 最重要的指标之一。从前述分析可以看到, 频率范围决定了 FBAR 所呈现的阻抗特性, 串/并联谐振频率所确定的阻抗极值点为架构 FBAR 滤波器奠定了基础, 而串/并联谐振频率点的精确位置以及稳定性是一款高性能 FBAR 滤波器的最根本需求^[8]。但当外界环境温度发生变化时, FBAR 的谐振频率通常会发生偏移, 偏移程度可用温度系数来表示, 通常取负值。为了稳定频率, 在 FBAR 的工艺制程中常添加具有正温度系数的温度补偿层来优化器件性能^[9]。除此之外, 还有若干指标常被用于表征 FBAR 性能。

(1) 有效机电耦合系数 k_{eff}^2

FBAR 的有效机电耦合系数 k_{eff}^2 可表征其电能与机械能之间的转换程度, 也常用来表示其串/并联谐振频率 f_s / f_p 的间隔大小, 其可由公式(3)^[10]或公式(4)^[11]进行计算。

$$k_{\text{eff}}^2 = \frac{\pi^2}{4} \cdot \frac{f_s}{f_p} \cdot \frac{f_p - f_s}{f_p} \quad (3)$$

$$k_{\text{eff}}^2 = \frac{\pi}{2} \frac{f_s}{f_p} / \tan \left(\frac{\pi}{2} \frac{f_s}{f_p} \right) \quad (4)$$

需要强调的是, k_{eff}^2 是 FBAR 的参数, 而 k_t^2 是材料本身的参数, 一般压电材料的 k_t^2 大小决定了 FBAR 的 k_{eff}^2 大小, 但 k_{eff}^2 还与器件的具体结构有关。通常所设计的 FBAR 滤波器的相对带宽为 k_{eff}^2 的一半^[12-13], 而业界追求具有更大带宽的滤波器。

(2) 品质因数 Q

品质因数 Q 表示在一个周期内器件存储能量与消耗能量的比率。FBAR 的 Q 值越高意味着其损耗能量越小, 构成的 FBAR 滤波器将具有更低的插入损耗、更陡峭的滚降特性等优势。工程上常用 -3 dB 带宽 $BW_{-3\text{dB}}$ 来估算 Q 值大小^[14], 计算公式如下:

$$Q_{s,p} = f_{s,p} / BW_{-3\text{dB}} \quad (5)$$

实际应用中, 普遍采用优值(Figure of Merit, FOM)来评估 FBAR 的性能($FOM = k_{\text{eff}}^2 \cdot Q$), FOM 越大, 器件的性能越优异。但器件中 k_{eff}^2 与 Q 值一般呈反向关系, 因此应基于 FOM 且兼顾 k_{eff}^2 与 Q 值来综合衡量 FBAR 的整体性能。

从上述等效电路模型、各数学关系式以及各参数的含义进行分析, 可知 FBAR 的性能与其所使用的材料(如密度、声速、介电常数、弹性劲度常数、压电应力常数)、所呈现的结构(如各叠层的面积、厚度)等有关, 而实际制备工艺将密切影响这些材料的性质与结构特征, 进而影响 FBAR 滤波器的综合性能。因此, 为了获得一款性能优异的 FBAR 滤波器, 研究人员在 FBAR 的基础理论、结构、材料、工艺等方面开展了深入探索, 例如 Al^[15-16]、Pt^[15-17]、

W^[15-16]、Mo^[15-18]、Ru^[15-16, 19]、Ir^[20]等电极材料以及 AlN、ZnO、PZT 等^[21]压电薄膜材料都得到了研究。但考虑到产品的综合性能、半导体工艺技术以及批量化商业生产等因素,目前市售的 BAW 滤波器芯片中,基本都是以 AlN 为压电薄膜,尤其是更易实现规模化量产的空腔型 FBAR 滤波器。故从实用角度出发,本文主要基于此体系或其衍生体系展开分析。

2 FBAR 滤波器的技术研究

随着制造技术的飞速发展和 5G 技术的推动,FBAR 滤波器领域迎来了高速增长的新阶段,但其在宽带化、高频化和高功率等关键领域仍面临着一系列技术难题的考验^[22]。故 FBAR 滤波器领域的研究重点持续聚焦于器件性能的提升,包括降低插入损耗、拓宽工作带宽、提升工作频率及其温度稳定性、增强功率承载能力、实现尺寸缩小以及功能集成等内容。归纳而言,当前国内外对 FBAR 滤波器关键技术的研究主要体现在三个核心方向:理论的持续探索与结构优化、压电薄膜材料的制备与特性调整、新型工艺的开发及技术融合。

2.1 理论的持续探索与结构优化

FBAR 滤波器的研发离不开理论研究与分析,而理论研究需要精确的模型支撑,但现实中影响滤波器性能的因素众多,目前缺乏涵盖所有影响因素的完美模型,故研究人员仍需不懈探索。随着载波聚合技术的应用及通信标准的迭代,无线通信中对 FBAR 滤波器线性度的要求愈发严格^[23]。对于 FBAR 滤波器构成的双工器,在现实工作场景里,其置身于大功率输出信号和干扰信号之中,故对非线性失真及其抑制都有着极高要求。如图 3 所示,在双工器中发射滤波器发射一个频率为 f_a 的信号,同时接收滤波器接收一个频率为 f_b 的杂散信号,两信号可能形成互调干扰 $|f_b \pm f_a|$ 、 $|2f_a \pm f_b|$,导致接

收频谱中产生频率为 f_b 的非线性互调干扰信号,接收机的信号捕获能力急剧下降^[24]。

为解决该问题,Hashimoto 等^[25]基于本构方程的微扰分析提出了 FBAR 的一维非线性响应等效电路模型,结果显示该模型可有效模拟二阶、三阶谐波响应,如图 4 所示。此外,Pang 等^[26]基于三维非线性压电方程,推导了适用于 BAW 器件的非线性耦合控制方程体系,并通过比较 COMSOL 有限元仿真的模型结果、解析结果和实验结果,证实了其可靠性。Schneider 等^[27]则将声学材料固有的线性以及非线性模型结合,实现了声学滤波器的频率变换。

在 FBAR 滤波器中主要考虑的是声波在压电薄膜厚度方向的传播,理想情况下的理论分析也多基于厚度方向的纵波展开。然而,实际情况下 FBAR 中既存在纵波也存在兰姆波^[28-29],虽然纵波为主模态,但兰姆波在器件中传播引起的横向模态和寄生模态也不可忽视。Qiu 等^[30]利用 LCR 非线性等效电路分析了 BAW 器件中横向模态诱发的非线性机理,研究显示横向模态产生的 m 次谐波大约被放大了 m 倍,这是由横向模态和主模态的场分量之间产生的分量引起的。事实上兰姆波导致的声波能量泄漏极大降低了器件 Q 值,为解决此问题,研究人员试图通过在器件顶电极边缘增加某些框架结构来抑制声波能量泄漏,从而尽可能将能量限制在 FBAR 的有源区^[31-34]。该框架结构多数为凸起的边缘电极及其变形结构或布拉格反射层结构,其典型结构形式如图 5 所示^[31]。为尽量减少寄生模态产生的杂波,一种有效方法是在 FBAR 中采用不规则形状的电极。时至今日,虽然该方法在一定频率范围内取得了显著成效,但当面对较高频率范围时便无法改善 FBAR 滤波器的性能。

另外,实用的 FBAR 滤波器必须具备良好的散热能力。如图 6 所示,FBAR 在工作时产生的热量主要沿着压电薄膜横向传导^[35],导致器件温度由中心

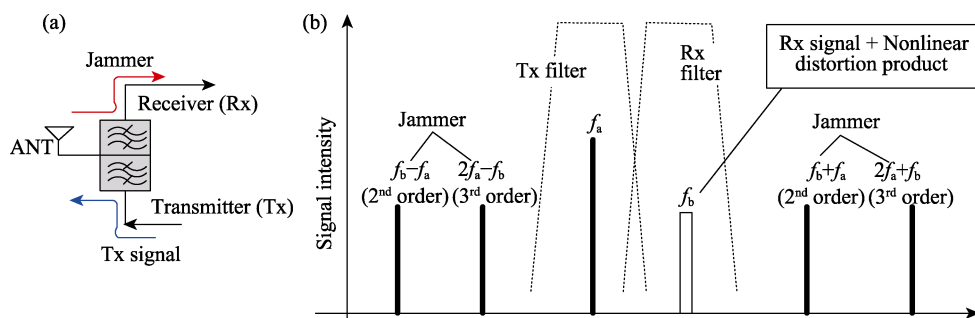
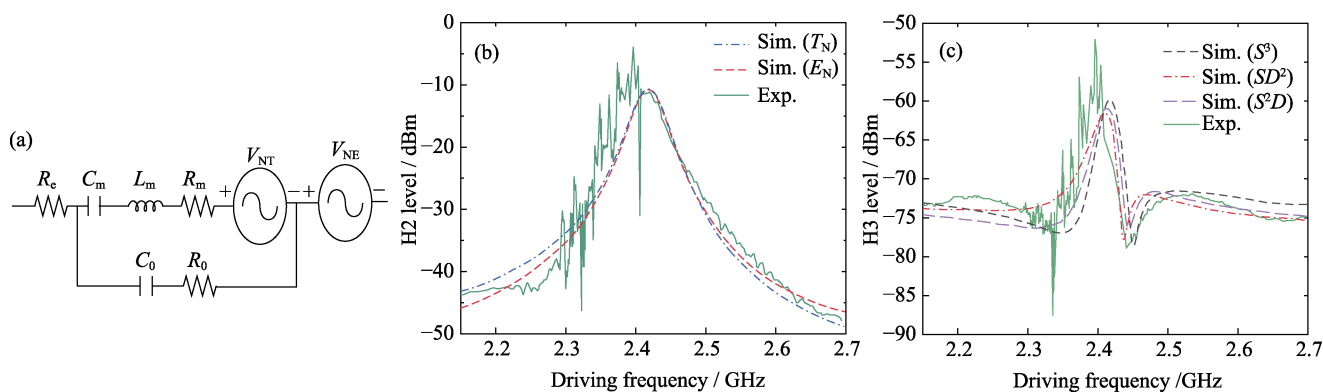


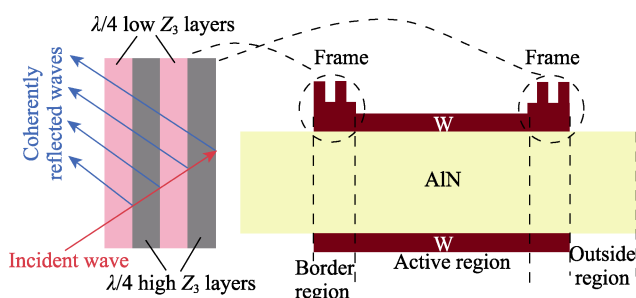
图 3 双工器的非线性失真^[23]

Fig. 3 Nonlinear distortion of the duplexer^[23]

(a) Circuit diagram; (b) Signal distribution

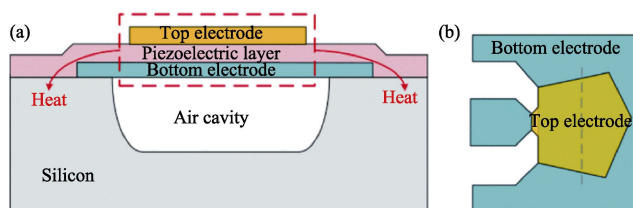
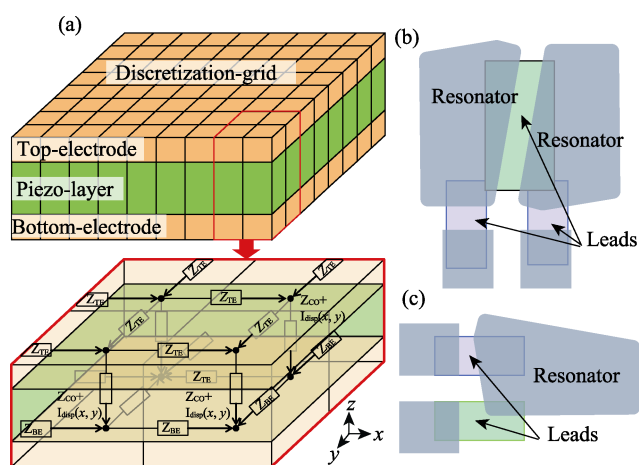
图4 基于 AlN 薄膜的 BAW 谐振器^[25]Fig. 4 BAW resonator based on AlN thin film^[25]

(a) Nonlinear circuit model; (b) Second harmonic response; (c) Third harmonic response

图5 具有边缘布拉格反射层结构的谐振器^[31]Fig. 5 Resonator with edge Bragg reflection layer structure^[31]

向四周大致呈梯度变化, 那么 FBAR 滤波器拓扑结构中不同位置器件产生的热量累积将对滤波器的整体性能产生巨大影响。随着器件体积的微缩以及工作频率的不断提高, FBAR 滤波器的稳定性、可靠性等都将随温度及其功率容量的变化而变化。因此, 基于仿真软件计算器件的温度参数, 并建立相应的温度模型, 对深入开展 FBAR 滤波器热传导机制的理论研究分析十分必要。

Fattinger 等^[36]为此将器件顶电极和底电极离散为电阻的横向网格, 并通过垂直连接电流源和分流阻抗得到如图 7(a)所示的电气网络。为确定馈电引线位置和几何形状对谐振腔电流分布的影响, 分析了如图 7(b, c)所示的两种不同馈电引线的几何形状结构。该研究揭示了器件的电极与馈电引线对电流分布的影响, 而不同电流所引发的焦耳热效应将使器件遭到破坏。

图6 FBAR 的(a)横截面和(b)俯视图^[35]Fig. 6 (a) Cross-section and (b) top view of FBAR^[35]图7 BAW 谐振器离散化模型及电极馈电引线^[36]Fig. 7 Discretized model and electrode feed lines of BAW resonator^[36]

(a) Schematic representation of discretized resonator model; (b) Two resonators in series and connected by broad lead; (c) Single resonator connected by narrow lead

制备 FBAR 滤波器的多数材料具有负温度系数的特征, 当环境温度发生变化时, 器件频率将出现温漂现象, 若滤波器的带宽较窄, 则很难有效滤除相邻频段的噪声干扰。通常在器件结构中增设 SiO_2 薄膜等具有正温度系数的叠层结构来解决此问题。Liu 等^[37]建立了 FBAR 的温补结构及其一维 Mason 等效电路模型, 并利用 ADS、HFSS、COMSOL 软件对温补型 FBAR 进行了仿真, 研究 SiO_2 厚度对温度补偿特性的影响。该研究表明在合适的 SiO_2 厚度下, 温补型 FBAR 的温度系数可以达 $0\text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ 。Wu 等^[38]同样对温补型 FBAR 进行了建模仿真, 随后利用所优化的一维电学模型建立了 FBAR 滤波器模型, 结果显示该滤波器的频率温度系数绝对值可达 $7.09 \times 10^{-6}\text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ 。这些研究为温度要求苛刻的高频应用提供了方案参考。

为进一步优化 FBAR 模型及所设计的滤波器,

已有研究分析了从制备器件中提取的压电薄膜材料的参数^[39], 研究人员也尝试了其它电极材料的可能性(如碳纳米管)^[40]。另外, 目前对 FBAR 滤波器整体电磁兼容性、版图布局及自动布局的工具开发等尚需深入钻研。为了微调 FBAR 的频率, 一般可在顶电极上沉积和图案化频率调节层^[41], 但 FBAR 滤波器的响应曲线主要是通过拓扑结构中各个串/并联 FBAR 的面积比来实现调控, 从前述内容可以预料到不同形状、不同面积的电极以及框架结构将极其考验实际的制备工艺能力。总而言之, 开发 FBAR 滤波器是一个工程性问题, 其涉及的理论解析、实际结构优化尚需深入挖掘以及进一步综合性、系统性的剖析。

2.2 压电薄膜材料的制备与特性调整

高质量的压电薄膜材料无疑是获得高性能 FBAR 滤波器的关键。在目前可商业生产的 FBAR 滤波器所用压电薄膜材料中, 多晶 AlN 薄膜在经过多年的技术迭代之后, 技术已然十分成熟, 但仍存在一个问题: 多晶 AlN 薄膜内部众多的位错和晶界等微观缺陷会引起声波能量的散射和衰减, 导致多晶 AlN-FBAR 的 k_{eff}^2 基本都小于 7.1%^[18, 42-43], 进而使多晶 AlN-FBAR 滤波器的最大相对带宽多为 3% 左右。这显然无法充分满足 5G 通信中宽频带的频谱需求, 故滤波器的带宽扩展亟需突破现有限制^[5-6, 44-45]。另外, 更需注意的是, 目前基于多晶 AlN 薄膜的技术路线已相当完善, 而且滤波器领域内的国际巨头企业已建立了坚固的专利壁垒。因此, 为研发可商业实施的 FBAR 滤波器, 研究人员便将更多目光投放到基于单晶或掺杂 AlN 薄膜材料的技术路线上。

2.2.1 基于单晶 AlN 薄膜材料的技术路线

相较于多晶 AlN 薄膜, 单晶 AlN 薄膜有着更少的微观缺陷和更高的薄膜材料质量, 而且即使厚度

较薄也能维持优异的压电特性, 这使单晶 AlN-FBAR 应用能够扩展至更高频段。Li 等^[46]早在 2006 年就报道了高质量单晶 AlN 薄膜的研究成果, 并率先指出单晶 AlN 薄膜为高性能 FBAR 的发展提供了良好契机, 接着对单晶 AlN 薄膜及其应用开展了持续研究并进行了大量的技术积累以及成果报道^[47-50], 各国研究人员随之也对单晶 AlN-FBAR 表现出了极高的热情。

2016 年 Shealy 等^[51]报道了一款单晶 AlN-FBAR, 其 k_{eff}^2 相比于多晶 AlN-FBAR 至少提升一倍, FOM 也增长了 30%。该团队还在碳化硅衬底上成功设计了一款 k_{eff}^2 为 7.63% 的单晶 AlN-FBAR^[52], 这在一定程度上证明了单晶 AlN 薄膜有助于提升器件性能。2018 年 Veturly 等^[53]在硅衬底上制备了单晶 AlN-FBAR, 测试显示由其制备得到的器件具有 5.2 GHz 的工作频率, 且 k_{eff}^2 为 6.26%, Q 值为 2136。此外该工作表明单晶 AlN-FBAR 展现出更优异的功率处理性能和更高的器件可靠性。2020 年 Shen 等^[54]介绍了基于单晶与多晶 AlN 薄膜的两种 3.55 GHz FBAR 滤波器。由于两者使用相同掩模板和相同工艺进行制造, 且封装在相同的层压板中, 故带宽性能非常相似。分析两种滤波器通带右侧边缘的功率扫描结果以及滤波器的插入损耗与其输入功率的关系(图 8)可知: 单晶 AlN-FBAR 滤波器最大处理功率可达 40.6 W, 同时保持了 1.2~1.4 dB 范围的低插入损耗; 而多晶 AlN-FBAR 滤波器最大处理功率为 22.5 W, 且插入损耗在 1.6~2.0 dB 之间。

2022 年 Ding 等^[55]设计了一款单晶 AlN-FBAR 滤波器, 如图 9 所示。通过在碳化硅衬底上外延生长单晶 AlN 薄膜, 然后将该薄膜转移到另一片碳化硅衬底, 获得了 k_{eff}^2 高达 72%、最大 Q 值为 837 的 FBAR,

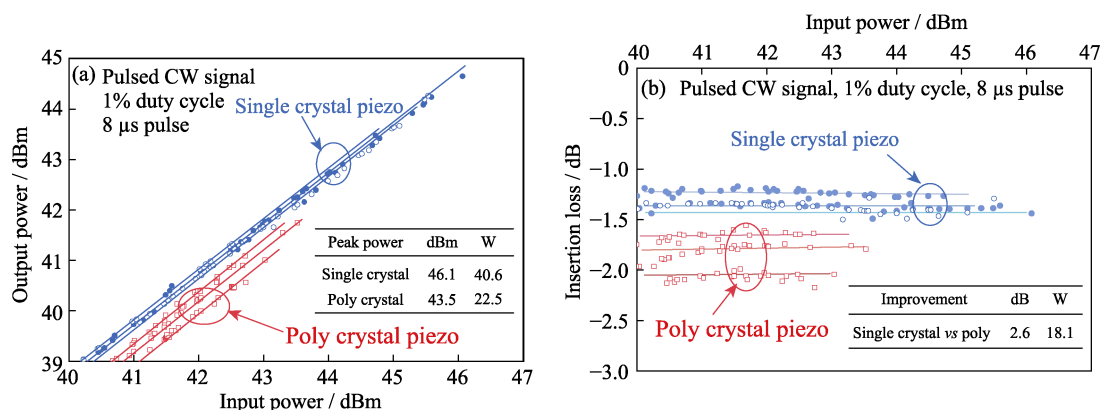
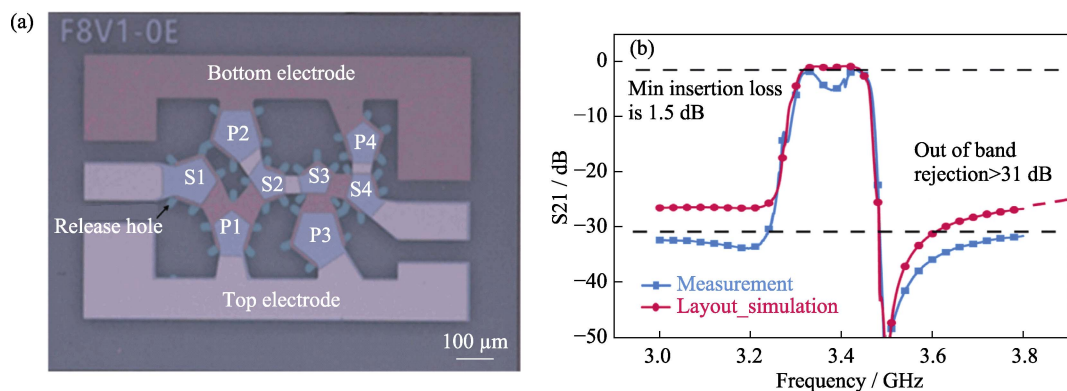


图 8 基于单晶和多晶 AlN 的 3.55 GHz FBAR 滤波器^[54]

Fig. 8 3.55 GHz FBAR filter based on single-crystal and polycrystalline AlN^[54]

(a) Measured power sweep at right band edge of the filters; (b) Measured insertion loss of the filters versus input power

图9 单晶 AlN-FBAR 滤波器^[55]Fig. 9 Single crystal AlN-FBAR filter^[55]

(a) Actual layout; (b) Simulated and measured transmission response curves

基于该 FBAR 所制备的滤波器的中心频率为 3.38 GHz, -3 dB 带宽为 160 MHz, 插入损耗为 1.5 dB, 带外抑制大于 31 dB。2023 年 Qin 等^[56]利用晶片键合与层转移技术制作了一款单晶 AlN-FBAR, 其谐振频率为 3.3 GHz, Q 值为 865, k_{eff}^2 为 5.0%。这些研究显示了单晶 AlN 薄膜在提升 FBAR 及其滤波器性能方面的潜力。

基于上述内容可以发现, 相对于多晶 AlN-FBAR, 单晶 AlN-FBAR 的性能更好, 但高质量单晶 AlN 薄膜的制备工艺较为复杂且成本不菲, 故为获得高性能、低成本的 FBAR, 研究人员不得不深入探索其制备工艺。

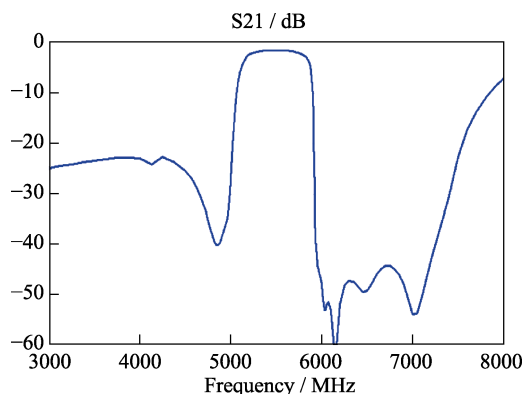
2.2.2 基于掺杂 AlN 薄膜材料的技术路线

为了获得更大带宽的 FBAR 滤波器, 必须解决单晶 AlN-FBAR k_{eff}^2 不足的困境, 而掺杂 AlN 薄膜可增强其所制备器件的 k_{eff}^2 。在当前技术背景下, 掺杂技术最适合于规模化生产, 故掺杂 AlN 薄膜以改变其压电特性已成为该研究领域最受关注的焦点之一, 其中 Sc 掺杂是目前最具产业化可能性的方案。

2009 年 Akiyama 等^[57]实验证实了掺 Sc 可显著提升 AlN 薄膜的压电特性, 随后业界对 AlScN 薄膜愈发重视。Moreira 等^[58]是较早将 AlScN 薄膜应用到 FBAR 的研究者, 他们在 2011 年报道了当 Sc 掺杂量达到 15%(原子分数)时, 所获 FBAR 的 k_{eff}^2 可达 12.07%。Umeda 等^[59]则在 2013 年介绍了 Sc 掺杂量为 35%(原子分数)的 AlN-FBAR, 该器件的 k_{eff}^2 为 15.5%。2017 年 Sano 等^[60]基于 $\text{Al}_{0.61}\text{Sc}_{0.39}\text{N}$ 薄膜实现了 k_{eff}^2 为 18.5%的 FBAR。2019 年 Park 等^[61]以外延生长的 Mo 作为底电极, 研究了基于 $\text{Al}_{0.88}\text{Sc}_{0.12}\text{N}$ 与 Mo 堆叠结构的 FBAR, 该器件是一款多频点器件, 模拟所得最高工作频率达 18.99 GHz。2020 年 Moe

等^[62]通过对 AlN 薄膜掺杂 28%(原子分数)的 Sc 而制备了一款 FBAR。该器件的 k_{eff}^2 最高可达 16%, 其在 3.5 GHz 工作时 Q 值高达 1070, FOM 为 158。同年 Wang 等^[63]通过 $\text{Al}_{0.7}\text{Sc}_{0.3}\text{N}$ 实现了 k_{eff}^2 达 18.1%的 FBAR 器件。这些工作为 FBAR 滤波器领域的研究人员打开了思路, 例如 Kim 等^[64]利用高掺杂 AlScN 薄膜开发了一款 k_{eff}^2 为 13.2%、最大 Q 值可达 1789 的 FBAR, 并基于此设计了一款在整个 6 GHz 频段性能表现良好的 FBAR 滤波器, 如图 10 所示。

接着, Zou 等^[65]基于 $\text{Al}_{0.8}\text{Sc}_{0.2}\text{N}$ 薄膜制备了一款 k_{eff}^2 为 14.5%、FOM 为 62 的 FBAR。该器件 f_s 和 f_p 的温度系数分别为 -19.2×10^{-6} 和 $-21.1 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, 表现出良好的温度稳定性, 且在此基础上所构筑的 FBAR 滤波器中心频率为 4.24 GHz, -3 dB 带宽为 215 MHz, 插入损耗为 1.881 dB, 带外抑制大于 32 dB, 在中心频率处测量到的回波损耗低于 -12 dB, 如图 11 所示。Dou 等^[66]则基于 $\text{Al}_{0.7}\text{Sc}_{0.3}\text{N}$ 薄膜与非对称的电极形状和边界框架结构设计了一款 k_{eff}^2 为 17.8%、

图10 FBAR 滤波器传输响应的测量值^[64]Fig. 10 Measured values of transmission response of FBAR filter^[64]

f_p 为 4.75 GHz 的 FBAR, 该器件同样具有非常高的温度稳定性。

事实上, AlScN 薄膜确实有利于获得更大带宽的 FBAR 滤波器, 但有研究表明 Sc 的掺杂量越大越难获得高质量的压电薄膜^[67], 故研究人员为获得性能更优的 FBAR 滤波器, 对 Sc 掺杂量进行了探索。Momida 等^[67]研究了 AlN 薄膜中 Sc 含量为 0~87.5%(原子分数)的掺杂情况, 结果显示 Sc 掺杂量大于 50%(原子分数)时, 所获薄膜的压电特性将丧失。另外有研究显示当 AlScN 薄膜中 Sc 掺杂量超过 6%(原子分数)时, 随着掺杂量继续增大, 器件的 Q 值将低于 2400 且急剧下降, 以至于器件失去实用价值。Bogner 等^[68]曾探讨 Sc 掺杂量对 AlScN 薄膜及 SMR-BAW

器件性能的影响, 研究发现当 Sc 掺杂量提升至 35%(原子分数)时, k_{eff}^2 相较于未掺杂器件实现了翻倍。然而伴随薄膜表面不规则晶粒数量增加, 器件的 Q 值明显下降, 此成果对 FBAR 的研究同样非常重要。另外, Mertin 等^[69]通过一系列表征手段详细分析了基于磁控溅射技术制备的 AlScN 薄膜的结构特性和表面形貌。结果显示随着 Sc 掺杂量增加, 薄膜(002)晶面的 X 射线衍射峰的半高峰宽从 1.30° 增大至 2° , 这表明晶粒在晶体 c 轴方向上的取向出现了偏离。当 Sc 掺杂量增至 42%(原子分数)时, 在薄膜表面存在大量呈三角锥形的异常晶粒, 而掺杂量较低时, 这类异常晶粒的出现频率相对较低, 如图 12 所示。

在器件实际的制备过程中, 掺 Sc AlN-FBAR 滤

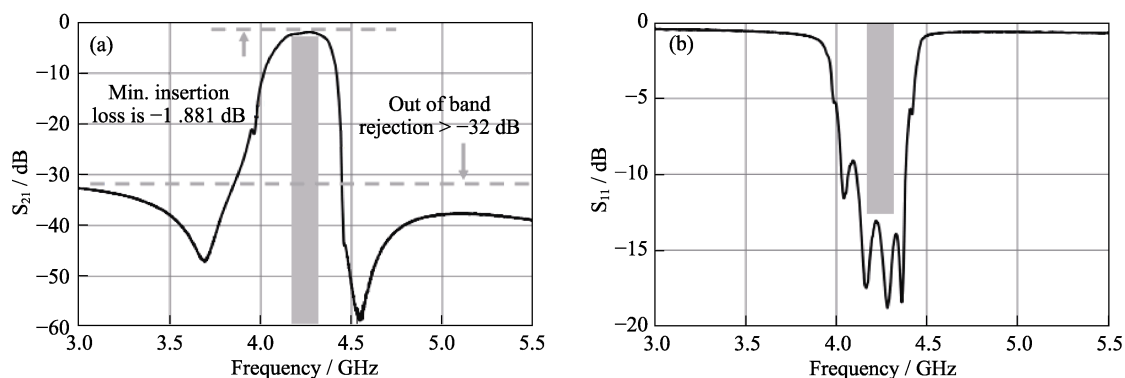


图 11 基于 $\text{Al}_{0.8}\text{Sc}_{0.2}\text{N}$ 薄膜制备的 FBAR 滤波器的实验结果^[65]

Fig. 11 Experimental results of FBAR filter fabricated with $\text{Al}_{0.8}\text{Sc}_{0.2}\text{N}$ film^[65]

(a) Transmission response of FBAR filter; (b) Return loss of the FBAR filter

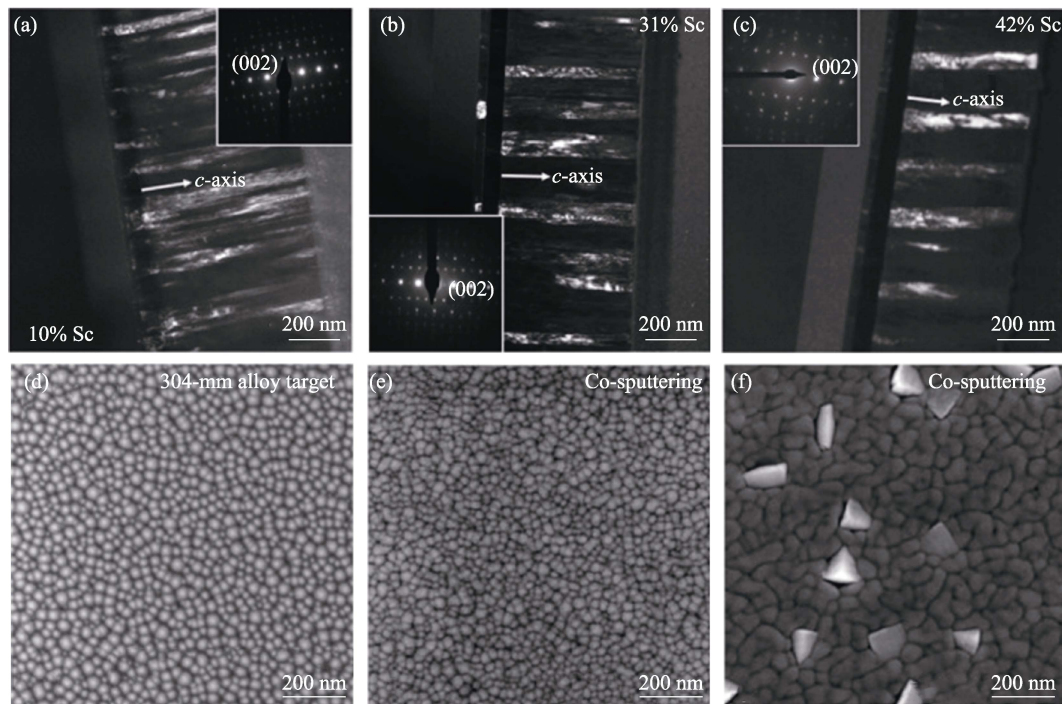


图 12 Sc 掺杂量对 $\text{Al}_{1-x}\text{Sc}_x\text{N}$ 薄膜质量及表面形貌的影响^[69]

Fig. 12 Effect of Sc-dopant concentration on crystal quality and surface morphology of $\text{Al}_{1-x}\text{Sc}_x\text{N}$ thin films^[69]

(a-c) TEM dark-field images and electron diffraction patterns for 10%, 31%, and 42% Sc content; (d-f) Corresponding SEM plane views

波器的制备工艺包含着多样化的掺杂选项、复杂的工艺流程以及漫长的验证周期。单就 AlScN 薄膜的制备而言,假以磁控溅射进行薄膜制备,那么生长过程中的溅射功率、衬底温度、气体压力、氮气/氩气比例等工艺参数都在不同程度上影响着薄膜质量。这导致传统的“试错式”实验需耗费海量的时间与成本,而且还不一定能取得所期盼的效果。为克服此困境,当前材料基因组技术有望提供一个创新的解决方案,并加快新材料的开发进程^[70-73]。材料基因组技术的核心在于高通量计算、高通量实验以及材料数据库^[74-75],其目标在于揭示材料的组成、微观结构等内在属性与其宏观性能之间的联系,以缩短材料研发及产品开发周期^[76-77]。在严格控制实验条件的前提下,采用高通量实验手段能够在较短时间内收集大量数据,这不仅有助于丰富现有数据库,建立材料特性与生产工艺、成分、微观结构等因素之间的联系,而且从中得到的规律性知识也能够为新材料的开发提供科学依据^[78]。为尽快找到合适的工艺窗口并制备高质量的 AlScN 薄膜,引入材料基因组技术及相应的定制化设备,在同一衬底上开发特定区域的精准薄膜沉积并验证多种工艺组合,这将极大缩减 FBAR 滤波器的研发周期。

除以上分析之外,为获得高性能的 FBAR 滤波器,近些年非 Sc 掺杂的 AlN 薄膜也已得到探究^[79-82],不过目前多为理论计算。而更为直接和有效的途径是采用 k_t^2 更高的压电薄膜材料,例如基于铌酸锂薄膜制备 FBAR 及其滤波器^[83-85]。但受限于当前的工艺能力,铌酸锂本身与半导体 IC 工艺制程的兼容性还存在巨大挑战,这导致目前难以实现基于铌酸锂 FBAR 滤波器的量产,这些技术距离商业应用仍有很长的路要走。

2.3 新工艺的开发及技术融合

新工艺的开发对高性能 FBAR 滤波器的制备有

着巨大影响,并为行业的发展注入了新的活力。本研究团队开创了基于单晶 AlN 体声波谐振器 (Single-crystalline Aluminum-nitride Bulk Acoustic Resonator, SABAR) 的 BAW 滤波芯片 SABAR[®] 技术路线,通过采用颠覆性的倒装键合技术对器件的空腔结构进行了革新设计,从而有效缓解了器件的损伤问题且提升了器件的耐用性。2022 年,本研究团队^[86]首先通过金属有机物化学气相沉积 (Metal-organic Chemical Vapor Deposition, MOCVD) 生长单晶 AlN 缓冲层,随后基于物理气相沉积 (Physical Vapor Deposition, PVD) 通过磁控溅射制备 AlN 薄膜,并采用应力补偿的策略显著提升了薄膜的质量。该工艺不仅制备了具有高质量和低应力特性的 AlN 薄膜,而且突破了磁控溅射在 AlN 薄膜制备方面长期面临的质量提升难题。随后本研究团队基于上述两步法所获 AlN 薄膜制备了实际的 FBAR,同时也基于单步 PVD 工艺制备了 AlN 薄膜及其 FBAR。两种不同工艺所获器件的性能如图 13 所示,可以看到采用两步法所获薄膜制备的 FBAR (Sample 1) 的 $k_{\text{eff}}^2 = 6.39\%$,其 Q 值比基于单步 PVD 工艺所获薄膜制备的 FBAR (Sample 2) 高 696,且史密斯圆更贴近边缘,这表明本研究团队开发的工艺可获得性能更优异的器件。

接着,本研究团队又开发了脉冲激光沉积 (Pulsed Laser Deposition, PLD) 与 MOCVD 结合生长制备单晶 AlN 薄膜的工艺技术^[87]。首先在硅衬底上通过 PLD 低温环境生长 ~ 30 nm 的 AlN 薄膜,随后再通过 MOCVD 高温环境生长 ~ 970 nm 的 AlN 薄膜。由于 PLD 的低温环境可有效抑制衬底表面原子向外延 AlN 薄膜进行扩散,而 MOCVD 的高温环境则能有效促进薄膜的横向生长,故 PLD+MOCVD 两步法可制备出更高质量单晶 AlN 薄膜。在此基础上,本研究团队利用独创的 SABAR[®] 工艺制备了单晶 AlN-FBAR 及

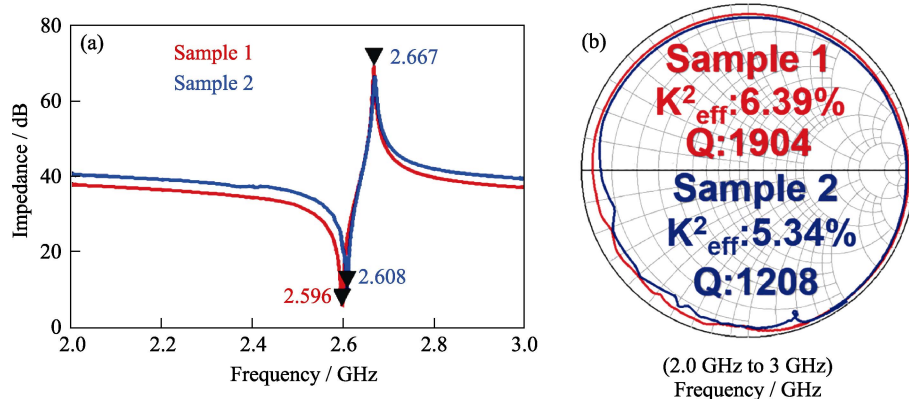


图 13 两步法 (Sample 1) 和单步 PVD 工艺 (Sample 2) 所获 FBAR 的性能对比^[86]

Fig. 13 Performance comparison of FBAR obtained by two-step (Sample 1) and single PVD (Sample 2) processes^[86]
(a) Frequency impedance characteristic curves; (b) Smith chart

其滤波器,如图 14 所示。结果显示所获 FBAR 的 $k_{\text{eff}}^2 = 6.25\%$, Q 值高达 4097, 且该 FBAR 滤波器相对基于 PVD 单步工艺所获 AlN 薄膜而制备的 FBAR 滤波器而言,具有更低的带内插入损耗和更好的带外抑制。这些工艺引起了行业关注,为研究人员提供了宝贵的借鉴。

新技术的引入与融合为 FBAR 滤波器的应用拓展了赛道。基于集成无源器件(Integrated Passive Device, IPD)技术的滤波器具有较大带宽,但其滚降性不足,故 FBAR 滤波器与之在技术上具有多方面互补性,因此融合 FBAR 与 IPD 技术的混合滤波器在日益增长的 5G 射频前端需求中逐渐崭露头角。为此, Zuo 等^[88]设计了一款基于 FBAR 与 IPD 技术的 N77 频段混合滤波器,如图 15 所示,该滤波器具有 3.3~4.2 GHz 的 900 MHz 的大带宽、200 MHz 处 36 dB 的高抑制及 2.5 dB 的低插入损耗,且面积仅为 $2.0 \text{ mm} \times 1.8 \text{ mm}$ 。

Chen 等^[89]报道了一款集成 FBAR 与 IPD 的 N41 频段混合滤波器的仿真设计,该滤波器的三维结构如图 16 所示。该混合滤波器相较于单一结构的 FBAR 滤波器具有更大的带宽,且在插入损耗、带

外抑制、非线性以及功率容量方面都具有更大的优势。Ding 等^[90]报道了一款适用于 N77 频段的混合滤波器,该滤波器由 $\text{Al}_{0.8}\text{Sc}_{0.2}\text{N}$ 薄膜的 BAW 谐振器与 IPD 混合构筑而成,其平均插入损耗为 -2 dB,带外抑制为 -28 dB,平均滚降为 250 MHz,有效面积仅为 $1 \text{ mm} \times 0.85 \text{ mm}$ 。这些结合 FBAR 而实现的混合滤波器的研发为研究人员拓展了思路。

Bogner 等^[91]通过引入无源全通技术的设计概念开发了一款适用于 N79 频段的 FBAR 滤波器,实现了多频段的共存使用。Wu 等^[92-93]报道了一种通过扩展传输线来增加 FBAR 滤波器频带宽度的方法,制备的两款混合 FBAR 滤波器分别实现了 24.9%和 56%的相对带宽、1.87 和 1.733 dB 的最小插入损耗、0.91 和 0.83 的矩形系数。利用传输线特性为设计滤波器提供了更大的灵活性和便利性,然而该技术所制备的两款滤波器的尺寸较大,无法应用于需要高度集成化以及微型化的通信设备之中。

随着 AI 技术的蓬勃发展,一些研究者已开始探索将机器学习与智能算法迁移应用于滤波器的设计之中,以此革新传统的滤波器设计方法。Sun 等^[94]提出了一种深度神经网络并将其应用于滤波器的辅

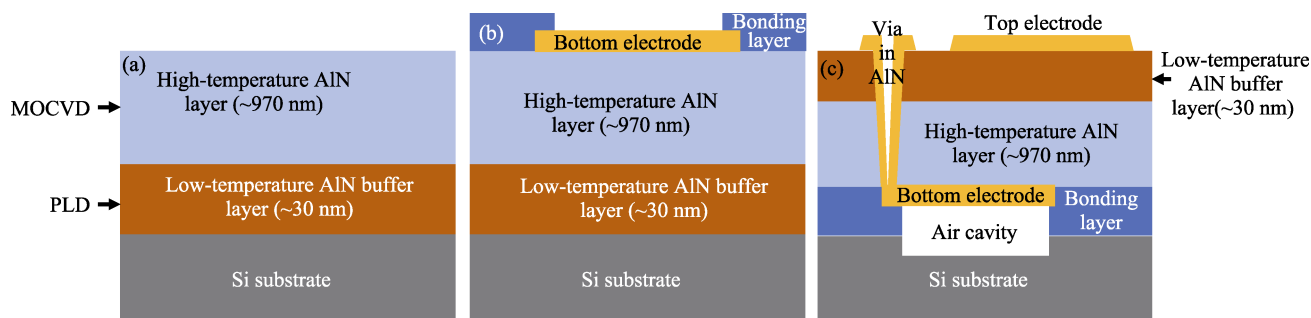


图 14 SABAR 工艺示意图^[87]

Fig. 14 Schematic diagram for SABAR process^[87]

(a) Combination of PLD and MOCVD AlN film; (b) Bottom electrode and bonding layer sputtered on top of AlN layer; (c) Resonator structure

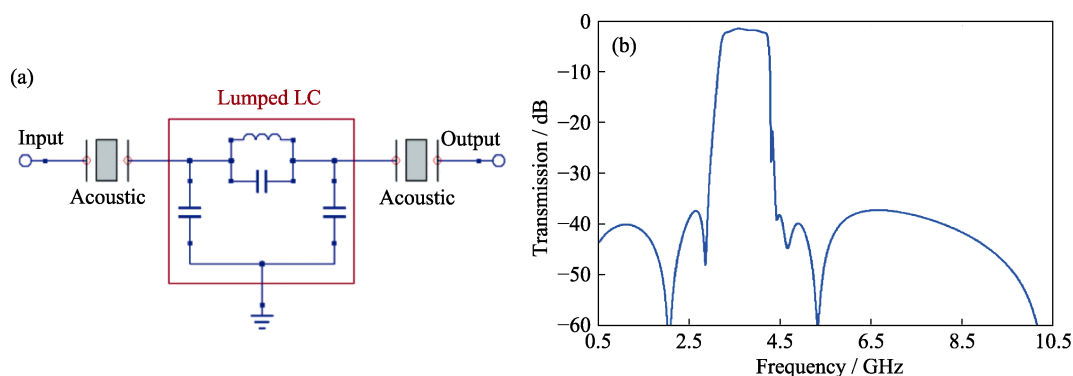


图 15 结合 FBAR 与 IPD 技术的 N77 频段混合滤波器^[88]

Fig. 15 N77-band hybrid filter based on FBAR and IPD technology^[88]

(a) Design schematic; (b) Simulated transmission response curve

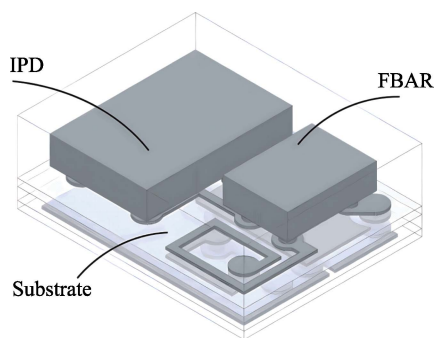
图 16 基于 FBAR 与 IPD 技术的 N41 频段混合滤波器^[89]

Fig. 16 N41-band hybrid filter based on FBAR and IPD technology^[89]

助设计, 所构建的神经网络模型如图 17 所示。该模型以滤波器的 S 参数组成的序列作为输入, 利用卷积(Convolutional)层来提取 S 参数的特征信息, 并通过全连接(Fully Connected)层来建立这些特征与耦合矩阵之间的映射关系, 从而高效预测滤波器耦合矩阵, 最后通过设计一款四阶带通滤波器进行了有效验证。Sallam 等^[95]提出了一种电路模型的卷积神经网络(Convolutional Neural Network, CNN)用于提取滤波器参数中的耦合矩阵, 该研究显示基于深度学习的 CNN 在提取耦合参数方面更加准确快速。随后, 用于高维滤波器的反向电磁行为建模和设计优化并集成传递函数和一维多通道的 CNN 也得到

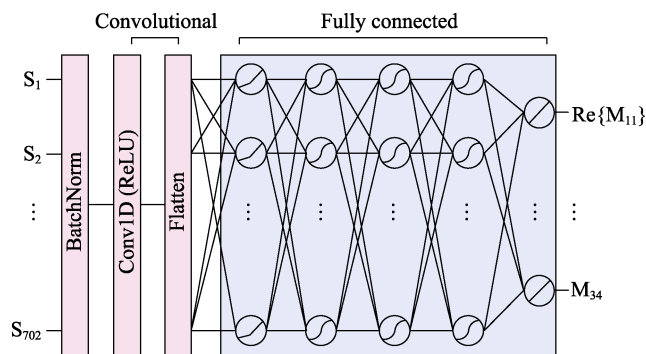
图 17 用于滤波器参数预测的卷积混合网络^[94]

Fig. 17 Convolutional hybrid network for the filter parameter prediction^[94]

了报道^[96], 针对滤波器而开发的基于特征辅助的人工神经网络多物理场优化技术也已被提出^[97]。当前, 尽管 AI 算法在滤波器设计中的应用还处于初级阶段, 但其无疑具有巨大潜力和发展空间, 可进一步助推 FBAR 滤波器的发展。

随着器件微型化进展以及智能终端设备性能优化的需求, 分立器件将逐渐被淘汰, 集成化设计已成为趋势, 且目前通信系统的瞬时带宽已从传统的 10 MHz 级别提升至 100 MHz 级别, 这离不开射频前端器件模块化、集成化技术^[98], 如图 18 所示。FBAR 的制备工艺兼容于传统 IC 工艺, 这便于 FBAR 滤波器与多种射频前端器件的一体化集成。

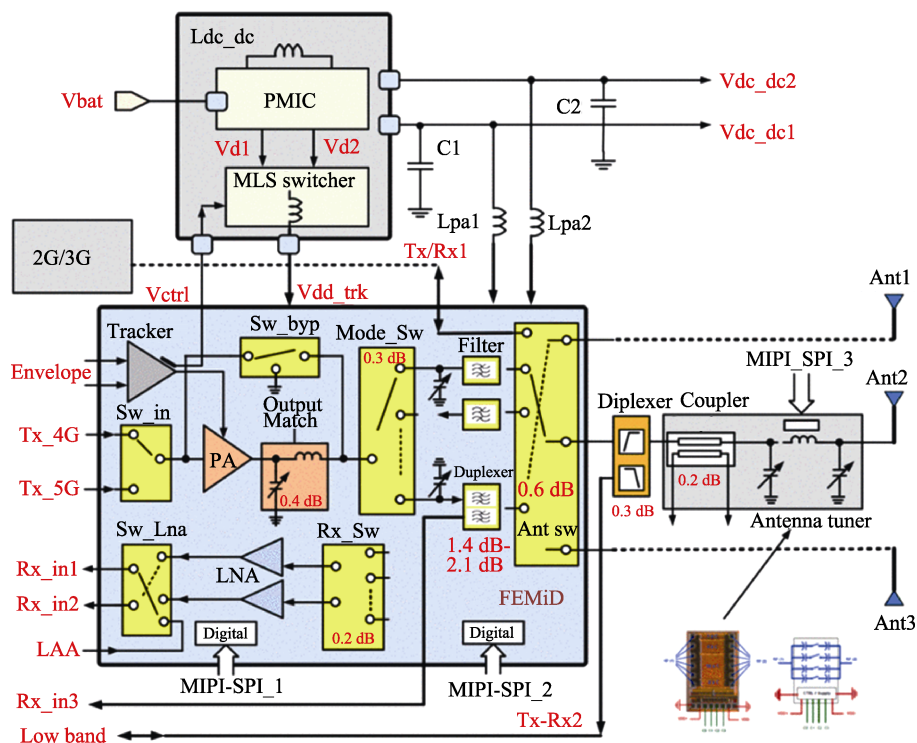
图 18 LTE 4G/5G 射频前端模块结构^[98]

Fig. 18 LTE 4G/5G radio frequency front end module structure^[98]

Moreira 等^[99]早在 2005 年就已提出将 FBAR 滤波器、低噪声放大器、单-差分变换器等模块集成化的思路。Pillai 等^[100]则将 FBAR 与互补金属氧化物半导体(Complementary Metal Oxide Semiconductor, CMOS)电路相结合, 打造了一款面积约为 $300\text{ }\mu\text{m}\times 250\text{ }\mu\text{m}$ 的集成系统。而 Gao 等^[101]基于异构片上的系统集成策略实现了 FBAR 与 CMOS 电路的集成, 顺利解决了工艺不兼容的问题。Campanella 等^[102]报道了一种集成 BAW 滤波器、射频绝缘体开关的单片射频前端模块, 该模块可实现多频带操作, 与系统级封装模块相比, 其采用的垂直集成可减少器件的占用面积, 并降低模块集成和设计的复杂性。Yu 等^[103]则将 FBAR 滤波器通过晶圆级封装技术集成到印刷电路板上, 且在印刷电路板的中间层设计了相应的匹配电感, 该方案不仅优化了 FBAR 滤波器的性能, 还具有微型化、高灵活性、易集成等特点。这些研究都为 FBAR 滤波器及其他射频前端器件的一体化集成提供了有价值的思路。

3 展望与结语

纵观 FBAR 滤波器的发展, 在其研究领域的探索之中, 虽然研究人员在各方面开展了大量的工作并取得了不错的突破, 但是当前各国研究人员依然普遍面临如下问题。

1) 结构的创新及理论模型的构建。FBAR 的几何形状、微观构造决定了热量的分布模式, 且对声波传输有着重要影响, 而现有理论模型在模拟预测与实验数据之间的一致性方面仍存在不足, 故在器件的结构创新及其理论模型方面还需更深入研究。

2) 高质量、高性能压电薄膜材料的制备与引入。晶格失配等问题是制备高质量压电薄膜材料中不可避免且尚未完全解决的挑战; 而铌酸锂等高性能压电薄膜材料的引入在制备工艺和批量化生产技术上仍面临巨大困难, 亟需进一步推进相关研究。

3) 工艺创新与集成。在 FBAR 滤波器的制造过程中, 传统的空腔结构制造工艺所采用的化学机械抛光和氢氟酸去除牺牲层的工艺往往会对材料和结构造成损伤, 进而影响所获器件的性能。有关新工艺的开发及其稳定性、规模化商业生产的适应性等问题仍有待持续且更系统的探索; FBAR 与 CMOS 工艺的集成技术仍在不断钻研之中, 有效集成的工艺路线与方法尚未完全成熟。

随着技术进步, FBAR 滤波器极可能凭借其优

势而在射频滤波器领域扮演更加重要的角色。但是, FBAR 滤波器领域的研究和开发是一个多学科交叉的复杂过程, 其涉及通信电子电路、材料科学、半导体微纳加工等多领域的协同合作, 故研究人员不仅要懂电路设计, 还要懂材料特性以及工艺参数的调整与优化, 且需要大量实践经验积累。由此造就了难以跨越的行业门槛, 所以该领域的研究除了需要长期投入之外, 还需更深层次的挖掘拓展以及分析。

首先, 从技术发展趋势和实用性角度考虑, 为了优化 FBAR 滤波器的插入损耗、带宽、工作频率、Q 值、功率容量、带外抑制等性能, 当前 FBAR 滤波器研究议题的讨论离不开以下几个核心要点: 理论及模型的建立与分析、结构的创新与优化、高性能压电薄膜材料的开发、制备工艺的创新或改进、与其他射频组件的一体化集成。其中, 射频前端芯片的发展趋势显示出明显的模块化、高度集成化特征, 然而能够提供此类解决方案的厂商目前还相对有限, 故在此方面提前进行战略布局至关重要。

其次, 在常规研究方法之外, 新技术的引入与融合也在不断探索。针对应用于 FBAR 滤波器中的 AlScN 薄膜, 由于掺杂实验过程复杂且耗时较长, 传统的“试错式”实验亟需创新性的替代方案, 而材料基因组技术代表了材料科学领域研究方法的突破性进展, 可尝试将其引入 FBAR 滤波器的研究制备之中, 以节约宝贵的研发时间与资源。另外, 将无源器件及其技术与 FBAR 技术相结合则有望成为推动 FBAR 滤波器性能进一步提升的重要途径。随着 AI 技术兴起, 将其引入 FBAR 滤波器的设计, 例如引入机器学习用于优化滤波器参数, 通过神经网络预测滤波器的响应特性, 利用 AI 技术辅助设计滤波器的版图布局与优化, 通过 AI 算法精确的预测和模拟, 可显著加速 FBAR 滤波器的研发进程, 但目前相关技术仍处于起步阶段, 这需要学术界与产业界的继续投入。

最后, 在现今可商业化生产的 FBAR 滤波器研发方面, 特别是对器件结构、材料、工艺等进行研发时, 对于踏足该领域的新入局者或中小企业而言, 需要特别关注所探索的技术路线是否能有效避开专利纠纷、是否适用于批量化的大规模生产, 如此才更有可能获得商业机遇。此外, 在开拓创新工艺路线并积极进行自身专利池布局与建设的同时, 还应积极促进与学术和科研机构的紧密协作, 可试探通过互补优势去建立强有力的合作伙伴关系而共同构建协同增效的合作模式。但是, 该领域内先行的头部企业不会坐视后来者的成长, 其也在积极进行新

技术的探索开发,技术迭代与专利保护阵列的建设都会挤兑后来者的生存空间。故对于新入局者或中小企业而言,窗口机遇有限,时间异常紧迫。因此,更大力度的资源整合与服务体系的建设有可能是一条成功路径,例如尝试联合其他企业签署全球专利交叉许可协议的形式而实现更有利的环境,积极布局技术、专利、产品、价格、服务等整体生态系统的建设与服务,以完善的生态系统去开拓赛道,从而获得市场以及实现技术赶追,但这必将是一个庞大且复杂的工程,极其考验各企业的智慧。

总而言之,滤波器的性能优劣往往决定了通信系统等产品的整体性能,在5G与Wi-Fi技术持续迭代以及6G技术已开始悄然布局的全球背景下,对FBAR滤波器不断开展深入研究已获得了行业的共识。为此,本文尝试从FBAR滤波器底层结构的原理与数学关系出发,对其研究理论、实用技术路线、新工艺的开发以及技术的引入与融合进行综述,目的在于协助研究人员快速掌握FBAR滤波器的发展态势,并期望能对业界发展提供适当参考。

参考文献:

- [1] CHAUHAN V, HUCK C, FRANK A, *et al.* Enhancing RF bulk acoustic wave devices: multiphysical modeling and performance. *IEEE Microwave Magazine*, 2019, **20(10)**: 56.
- [2] WU Z, SHI B, LI Y, *et al.* Use of heavy dielectric materials in solidly mounted A1 mode resonators based on lithium niobate. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2022, **61(SG)**: SG1001.
- [3] LI M, EL-HAKIKI M, KALIM D, *et al.* A fully matched LTE-A carrier aggregation quadplexer based on BAW and SAW technologies. 2014 IEEE International Ultrasonics Symposium, Chicago, 2014: 77.
- [4] CHEN J C, YANG H Y, WU J W, *et al.* Widening the data pipeline: a carrier aggregation BAW quadplexer module. *IEEE Microwave Magazine*, 2018, **19(2)**: 62.
- [5] LIU Y, CAI Y, ZHANG Y, *et al.* Materials, design, and characteristics of bulk acoustic wave resonator: a review. *Micromachines*, 2020, **11(7)**: 630.
- [6] AIGNER R, FATTINGER G. 3G-4G-5G: how BAW filter technology enables a connected world. 2019 20th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems & Eurosensors XXXIII (TRANSDUCERS & EUROSENSORS XXXIII), Berlin, 2019: 523.
- [7] LAKIN K M, KLINE G R, MCCARRON K T. High-Q microwave acoustic resonators and filters. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 1993, **41(12)**: 2139.
- [8] FATTINGER G G. BAW resonator design considerations-an overview. 2008 IEEE International Frequency Control Symposium, Honolulu, 2008: 762.
- [9] HEEREN W, FATTINGER M, FATTINGER G, *et al.* Impact of thermo-mechanical stress on the TCF of WLP BAW filters. 2016 IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS), Tours, 2016: 1.
- [10] BI F Z, BARBER B P. Bulk acoustic wave RF technology. *IEEE Microwave Magazine*, 2008, **9(5)**: 65.
- [11] RUBY R. The 'how & why' a deceptively simple acoustic resonator became the basis of a multi-billion dollar industry. 2017 IEEE 30th International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS), Las Vegas, 2017: 308.
- [12] LAKIN K, BELSICK J, MCDONALD J, *et al.* Improved bulk wave resonator coupling coefficient for wide bandwidth filters. 2001 IEEE Ultrasonics Symposium. Proceedings. An International Symposium (Cat. No. 01CH37263), Atlanta, 2001: 827.
- [13] RUBY R. Review and comparison of bulk acoustic wave FBAR, SMR technology. 2007 IEEE Ultrasonics Symposium, New York, 2007: 1029.
- [14] FELD D A, PARKER R, RUBY R, *et al.* After 60 years: a new formula for computing quality factor is warranted. 2008 IEEE Ultrasonics Symposium, Beijing, 2008: 431.
- [15] UEDA M, NISHIHARA T, TANIGUCHI S, *et al.* Film bulk acoustic resonator using high-acoustic-impedance electrodes. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2007, **46(7S)**: 4642.
- [16] KAITILA J. 3C-1 review of wave propagation in BAW thin film devices-progress and prospects. 2007 IEEE Ultrasonics Symposium Proceedings, New York, 2007: 120.
- [17] LIN Y C, HONG C R, CHUANG H A. Fabrication and analysis of ZnO thin film bulk acoustic resonators. *Applied Surface Science*, 2008, **254(13)**: 3780.
- [18] KAMOHARA T, AKIYAMA M, KUWANO N. Influence of molybdenum bottom electrodes on crystal growth of aluminum nitride thin films. *Journal of Crystal Growth*, 2008, **310(2)**: 345.
- [19] NOR N I M, SHAH K, SINGH J J, *et al.* Film bulk acoustic wave resonator (FBAR) filter for Ku-band transceiver. Nanotechnology Conference and Expo (NSTI-Nanotech 2013), Washington, 2013: 169.
- [20] CLEMENT M, IBORRA E, OLIVARES J, *et al.* DCS Tx filters using AlN resonators with iridium electrodes. *IEEE Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics and Frequency Control*, 2010, **57(3)**: 518.
- [21] AIGNER R. MEMS in RF-filter applications: thin film bulk-acoustic-wave technology. 13th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems, Seoul, 2005: 5.
- [22] LI Y, GONG K, WONG Y P, *et al.* Comparative study of piston mode designs for temperature-compensated surface acoustic wave resonators using SiO₂/LiNbO₃ structure. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2022, **61(SG)**: SG1020.
- [23] NAKAGAWA R, SUZUKI T, SHIMIZU H, *et al.* Discussion about generation mechanisms of third-order nonlinear signals in surface acoustic wave resonators based on simulation. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2016, **55(7S1)**: 07KD02.
- [24] UEDA M, IWAKI R, NISHIHARA R, *et al.* Nonlinear distortion of acoustic devices for radio-frequency front-end circuit and its suppression. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2010, **49(7S)**: 07HD12.
- [25] HASHIMOTO K Y, LI X, BAO J, *et al.* Perturbation analysis of nonlinearity in radio frequency bulk acoustic wave resonators using mass-spring model. *IEEE Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics and Frequency Control*, 2020, **67(7)**: 1479.
- [26] PANG X N, YONG Y K. Simulation of nonlinear resonance, amplitude-frequency, and harmonic generation effects in SAW and BAW devices. *IEEE Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics*

- and Frequency Control, 2019, **67(2)**: 422.
- [27] SCHNEIDER J D, LU T, TIWARI S, *et al.* Frequency conversion through nonlinear mixing in acoustic waves. *Journal of Applied Physics*, 2020, **128(6)**: 064105.
- [28] ASSILA N, KADOTA M, OHASHI Y, *et al.* High velocity lamb waves in LiTaO₃ thin plate for high frequency filters. 2016 IEEE International Frequency Control Symposium (IFCS), New Orleans, 2016: 333.
- [29] HE Y, WONG Y P, WU T, *et al.* Full 3D FEM simulation of thickness shear bulk acoustic resonators on LN assisted by hierarchical cascading technique. 2021 IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS), Xi'an, 2021: 1.
- [30] QIU L, LI X Y, MATSUOKA N, *et al.* Emphasis mechanism of nonlinear responses caused by transverse modes in RF BAW devices. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2020, **59(SK)**: SKKC02.
- [31] NGUYEN N T B, JOHANNESSEN A, HANKE U. Design of high-Q thin film bulk acoustic resonator using dual-mode reflection. 2014 IEEE International Ultrasonics Symposium, Chicago, 2014: 487.
- [32] LI X, BAO J, HUANG Y, *et al.* Use of double-raised-border structure for quality factor enhancement of type II piston mode FBAR. *Microsystem Technologies*, 2018, **24(7)**: 2991.
- [33] NGUYEN N, JOHANNESSEN A, ROTH S, *et al.* A design approach for high-Q FBARs with a dual-step frame. *IEEE Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics and Frequency Control*, 2018, **65(9)**: 1717.
- [34] REN J, CHU H, BAI Y, *et al.* Research and design of high sensitivity FBAR micro-mass sensors. 2020 Asia Conference on Geological Research and Environmental Technology, Kamakura, 2021: 042014.
- [35] SETOODEH S, KEMIKTARAK U, BAYATPUR F, *et al.* A high power circuit model of an FBAR resonator for use in filter design. 2019 IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS), Glasgow, 2019: 2169.
- [36] FATTINGER M, KREUZER S. BAW filters for 5G: lead geometry impact on current distribution in resonators. 2020 IEEE MTT-S International Conference on Microwaves for Intelligent Mobility (ICMIM), Linz, 2020: 1.
- [37] LIU Y, SUN K, MA J, *et al.* Design and fabrication of temperature-compensated film bulk acoustic resonator filter based on the stress compensation effect. *Coatings*, 2022, **12(8)**: 1126.
- [38] WU X, XU L, SHI G, *et al.* Design and modeling of film bulk acoustic resonator considering temperature compensation for 5G communication. *Analog Integrated Circuits and Signal Processing*, 2024, **118(2)**: 219.
- [39] HAOPENG W, CAI X, WU Y, *et al.* An investigation on extraction of material parameters in longitudinal mode of FBAR. *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, 2020, **67(6)**: 1024.
- [40] NOR N I M, HASNI A H M, KHALID N, *et al.* Carbon nanotube as electrode in film bulk acoustic wave resonator for improved performance. International Conference on Applied Photonics and Electronics 2019 (InCAPE 2019), Putrajaya, 2020: 020021.
- [41] LU R, YANG Y, LINK S, *et al.* Al resonators in 128° Y-cut lithium niobate with electromechanical coupling of 46.4%. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2020, **29(3)**: 313.
- [42] SATOH Y, NISHIHARA T, YOKOYAMA T, *et al.* Development of piezoelectric thin film resonator and its impact on future wireless communication systems. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2005, **44(5A)**: 2883.
- [43] WANG L P, GINSBURG E, GERFERS F, *et al.* Sputtered AlN thin films for piezoelectric MEMS devices. *SENSORS*, 2006 IEEE, Daegu, 2006: 10.
- [44] MAHON S. The 5G effect on RF filter technologies. *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, 2017, **30(4)**: 494.
- [45] AIGNER R, FATTINGER G, SCHAEFER M, *et al.* BAW filters for 5G bands. 2018 IEEE International Electron Devices Meeting (IEDM), San Francisco, 2018: 1451.
- [46] LI G, KIM T W, INOUE S, *et al.* Epitaxial growth of single-crystalline AlN films on tungsten substrates. *Applied Physics Letters*, 2006, **89(24)**: 241905.
- [47] YANG H, WANG W, LIU Z, *et al.* Epitaxial growth of 2 inch diameter homogeneous AlN single-crystalline films by pulsed laser deposition. *Journal of Physics D-Applied Physics*, 2013, **46(10)**: 105101.
- [48] LIN Y, YANG M, WANG W, *et al.* High-quality crack-free GaN epitaxial films grown on Si substrates by a two-step growth of AlN buffer layer. *CrystEngComm*, 2016, **18(14)**: 2446.
- [49] JIANGHUA L, WENLIANG W, YULIN Z, *et al.* AlN/nitrided sapphire and AlN/non-nitrided sapphire hetero-structures epitaxially grown by pulsed laser deposition: a comparative study. *Vacuum*, 2017, **143**: 241.
- [50] WANG H, LI Z, WANG W, *et al.* Growth mechanisms of GaN epitaxial films grown on *ex situ* low-temperature AlN templates on Si substrates by the combination methods of PLD and MOCVD. *Journal of Alloys and Compounds*, 2017, **718**: 28.
- [51] SHEALY J B, SHEALY J B, PATEL P, *et al.* Single crystal aluminum nitride film bulk acoustic resonators. 2016 IEEE Radio and Wireless Symposium (RWS), Austin, 2016: 16.
- [52] SHEALY J B, VETURY R, GIBB S R, *et al.* Low loss, 3.7 GHz wideband BAW filters, using high power single crystal AlN-on-SiC resonators. 2017 IEEE MTT-S International Microwave Symposium (IMS), Honolulu, 2017: 1476.
- [53] VETURY R, HODGE M D, SHEALY J B. High power, wideband single crystal XBAW technology for sub-6 GHz micro RF filter applications. 2018 IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS), Kobe, 2018: 206.
- [54] SHEN Y, ZHANG R, VETURY R, *et al.* 40.6 watt, high power 3.55 GHz single crystal XBAW RF filters for 5G infrastructure applications. 2020 IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS), Las Vegas, 2020: 1.
- [55] DING R, XUAN W, DONG S, *et al.* The 3.4 GHz BAW RF filter based on single crystal AlN resonator for 5G application. *Nanomaterials*, 2022, **12(17)**: 3082.
- [56] QIN R, ZHOU C, DOU W, *et al.* 3.3 GHz BAW resonators fabricated on single crystal AlN templates. 2023 IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS), Montreal, 2023: 1.
- [57] AKIYAMA M, KAMOHARA T, KANO K, *et al.* Enhancement of piezoelectric response in scandium aluminum nitride alloy thin films prepared by dual reactive cosputtering. *Advanced Materials*, 2009, **21(5)**: 593.
- [58] MOREIRA M, BJURSTRÖM J, KATARDJEV I, *et al.* Aluminum scandium nitride thin-film bulk acoustic resonators for wide band applications. *Vacuum*, 2011, **86(1)**: 23.

- [59] UMEDA K, KAWAI H, HONDA A, *et al.* Piezoelectric properties of ScAlN thin films for piezo-MEMS devices. 2013 IEEE 26th International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS), Taipei, 2013: 733.
- [60] SANO K H, KARASAWA R, YANAGITANI T. High electromechanical coefficient $k_t^2=19\%$ thick ScAlN piezoelectric films for ultrasonic transducer in low frequency of 80 MHz. 2017 IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS), Washington, 2017: 1.
- [61] PARK M, WANG J, DARGIS R, *et al.* Super high-frequency scandium aluminum nitride crystalline film bulk acoustic resonators. 2019 IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS), Glasgow, 2019: 1689.
- [62] MOE C, OLSSON R H, PATEL P, *et al.* Highly doped AlScN 3.5 GHz XBAW resonators with 16% k_{eff}^2 for 5G RF filter applications. 2020 IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS), Las Vegas, 2020: 1.
- [63] WANG J, PARK M, MARTIN S, *et al.* A film bulk acoustic resonator based on ferroelectric aluminum scandium nitride films. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2020, **29**(5): 741.
- [64] KIM D, MORENO G, BI F, *et al.* Wideband 6 GHz RF filters for Wi-Fi 6E using a unique BAW process and highly Sc-doped AlN thin film. 2021 IEEE MTT-S International Microwave Symposium (IMS), Atlanta, 2021: 207.
- [65] ZOU Y, GAO C, ZHOU J, *et al.* Aluminum scandium nitride thin-film bulk acoustic resonators for 5G wideband applications. *Microsystems & Nanoengineering*, 2022, **8**(1): 124.
- [66] DOU W, ZHOU C, QIN R, *et al.* Super-high-frequency bulk acoustic resonators based on aluminum scandium nitride for wideband applications. *Nanomaterials*, 2023, **13**(20): 2737.
- [67] MOMIDA H, TESHIGAHARA A, OGUCHI T. Strong enhancement of piezoelectric constants in $\text{Sc}_x\text{Al}_{1-x}\text{N}$: first-principles calculations. *AIP Advances*, 2016, **6**(6): 065006.
- [68] BOGNER A, TIMME H J, BAUDER R, *et al.* Impact of high Sc content on crystal morphology and RF performance of sputtered $\text{Al}_{1-x}\text{Sc}_x\text{N}$ SMR BAW. 2019 IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS), Glasgow, 2019: 706.
- [69] MARTIN S, HEINZ B, RATTUNDE O, *et al.* Piezoelectric and structural properties of *c*-axis textured aluminium scandium nitride thin films up to high scandium content. *Surface & Coatings Technology*, 2018, **343**: 2.
- [70] GREEN M L, CHOI C L, HATTRICK-SIMPERS J R, *et al.* Fulfilling the promise of the materials genome initiative with high-throughput experimental methodologies. *Applied Physics Reviews*, 2017, **4**(1): 011105.
- [71] LIU Y H, HU Z H, SUO Z G, *et al.* High-throughput experiments facilitate materials innovation: a review. *Science China (Technological Sciences)*, 2019, **62**(4): 521.
- [72] DE PABLO J J, JACKSON N E, WEBB M A, *et al.* New frontiers for the materials genome initiative. *npj Computational Materials*, 2019, **5**(1): 41.
- [73] WANG R, XU C, DONG R, *et al.* A secured big-data sharing platform for materials genome engineering: state-of-the-art, challenges and architecture. *Future Generation Computer Systems-The International Journal of eScience*, 2023, **142**: 59.
- [74] HIMANEN L, GEURTS A, FOSTER A S, *et al.* Data-driven materials science: status, challenges, and perspectives. *Advanced Science*, 2019, **6**(21): 1900808.
- [75] TAN C, WU H, YANG L, *et al.* Cutting edge high-throughput synthesis and characterization techniques in combinatorial materials science. *Advanced Materials Technologies*, 2024, **9**(10): 2302038.
- [76] HATTRICK-SIMPERS J R, GREGOIRE J M, KUSNE A G. Perspective: composition–structure–property mapping in high-throughput experiments: turning data into knowledge. *APL Materials*, 2016, **4**(5): 2832.
- [77] CASUKHELA R, VIJAYAN S, JINSCHKE J R, *et al.* A framework for the optimal selection of high-throughput data collection workflows by autonomous experimentation systems. *Integrating Materials and Manufacturing Innovation*, 2022, **11**(4): 557.
- [78] LUDWIG A. Discovery of new materials using combinatorial synthesis and high-throughput characterization of thin-film materials libraries combined with computational methods. *npj Computational Materials*, 2019, **5**(1): 70.
- [79] MANNA S, BRENNECKA G L, STEVANOVIĆ V, *et al.* Tuning the piezoelectric and mechanical properties of the AlN system via alloying with YN and BN. *Journal of Applied Physics*, 2017, **122**(10): 105101.
- [80] HIRATA K, YAMADA H, UEHARA M, *et al.* First-principles study of piezoelectric properties and bonding analysis in (Mg, X, Al)N solid solutions (X = Nb, Ti, Zr, Hf). *ACS Omega*, 2019, **4**(12): 15081.
- [81] HIRATA K, MORI Y, YAMADA H, *et al.* Significant enhancement of piezoelectric response in AlN by Yb addition. *Materials*, 2021, **14**(2): 309.
- [82] YU X, ZHU L, LI X, *et al.* Doping engineering for optimizing piezoelectric and elastic performance of AlN. *Materials*, 2023, **16**(5): 1778.
- [83] BOUSQUET M, PERREAU P, JOULIE A, *et al.* 4.2 GHz LiNbO_3 film bulk acoustic resonator. 2021 IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS), Xi'an, 2021: 1.
- [84] REINHARDT A, BOUSQUET M, JOULIE A, *et al.* Lithium niobate film bulk longitudinal wave resonator. 2021 Joint Conference of the European Frequency and Time Forum and IEEE International Frequency Control Symposium (EFTF/IFCS), Gainesville, 2021: 1.
- [85] BOUSQUET M, BOREL E, JOULIE A, *et al.* LiNbO_3 film bulk acoustic resonator for n79 band. 2022 IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS), Venice, 2022: 1.
- [86] YI X, ZHAO L, OUYANG P, *et al.* High-quality film bulk acoustic resonators fabricated on AlN films grown by a new two-step method. *IEEE Electron Device Letters*, 2022, **43**(6): 942.
- [87] OUYANG P, YI X, LI G. Single-crystalline bulk acoustic wave resonators fabricated with AlN film grown by a combination of PLD and MOCVD methods. *IEEE Electron Device Letters*, 2024, **45**(4): 538.
- [88] ZUO C, HE C, CHENG W, *et al.* Hybrid filter design for 5G using IPD and acoustic technologies. 2019 IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS), Glasgow, 2019: 269.
- [89] CHEN L, LING F. Addressing 5G NR filter challenges with hybrid technologies. 2022 IEEE 72nd Electronic Components and Technology Conference (ECTC), San Diego, 2022: 1914.
- [90] DING R, XUAN W, GAO F, *et al.* Compact and high steep skirts hybrid heterogeneous integrated N77 full band BAW filter based on band-stop theory. *IEEE Electron Device Letters*, 2024, **45**(5): 793.
- [91] BOGNER A, BAUDER R, TIMME H J, *et al.* All-pass based filter

- design using BAW resonators. 2019 IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS), Glasgow, 2019: 1685.
- [92] WU H P, WU Y L, LAI Z G, *et al.* A hybrid film-bulk-acoustic-resonator/coupled-line/transmission-line high selectivity wideband bandpass FBAR filter. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2020, **68(8)**: 3389.
- [93] WU H P, WU Y L, LAI Z G, *et al.* A hybrid filter with extremely wide bandwidth and high selectivity using FBAR network. *IEEE Transactions on Circuits and Systems II-Express Briefs*, 2022, **69(7)**: 3164.
- [94] SUN J I, SUN S, YU X, *et al.* A deep neural network based tuning technique of lossy microwave coupled resonator filters. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2019, **61(9)**: 2169.
- [95] SALLAM T, ATTIYA A M. Convolutional neural network for coupling matrix extraction of microwave filters. *Applied Computational Electromagnetics Society Journal*, 2022, **37(7)**: 805.
- [96] REN Y, DENG X, YOU Z, *et al.* 1-D multi-channel CNN with transfer functions for inverse electromagnetic behaviors modeling and design optimization of high-dimensional filters. *Applied Intelligence*, 2023, **54(1)**: 503.
- [97] FU J, JIN J, YANG J, *et al.* Feature-assisted neural network surrogate-based multiphysics optimization for microwave filters. *IEEE Microwave and Wireless Technology Letters*, 2024, **34(5)**: 474.
- [98] BALTEANU F, DROGI S, CHOI Y, *et al.* Multiple transmitter coexistence for 5G RF front end modules. 2021 51st European Microwave Conference (EuMC), London, 2022: 180.
- [99] MOREIRA C P, SHIRAKAWA A A, KERHERVE E, *et al.* Design of a fully-integrated BiCMOS/FBAR reconfigurable RF receiver front-end. 18th annual symposium on Integrated circuits and system design, New York, 2005: 138.
- [100] PILLAI G, ZOPE A A, TSAI M L, *et al.* 3-GHz BAW composite resonators integrated with CMOS in a single-chip configuration. 2016 IEEE International Frequency Control Symposium (IFCS), New Orleans, 2016: 1.
- [101] GAO C, ZHANG M, JIANG Y, *et al.* A monolithic FBAR oscillator based on heterogeneous system-on-chip integration. 2019 IEEE 32nd International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS), Seoul, 2019: 895.
- [102] CAMPANELLA H, QIAN Y, ROMERO C O, *et al.* Monolithic multiband MEMS RF front-end module for 5G mobile. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2020, **30(1)**: 72.
- [103] YU H, WANG X, PENG X, *et al.* Performance optimization of FBAR filters with wafer-level chip-scale package using embedded matching inductors on multilayer PCB. 2022 IEEE MTT-S International Microwave Workshop Series on Advanced Materials and Processes for RF and THz Applications (IMWS-AMP), Guangzhou, 2022: 1.