

Study on Thin Film Bulk Acoustic Resonator (FBAR) Filter*

LIAO Junjie¹, FENG Yaogang¹, WAN Caixin², CAI Chunhua^{2,3}, QIN Ming¹, ZHANG Zhiqiang^{1*}

(1. Key Laboratory of MEMS of the Ministry of Education, Southeast University, Nanjing Jiangsu 210096, China;

2. Will Semiconductor Co., Ltd, Shanghai 201203, China;

3. Shanghai Key Laboratory of Multidimensional Information Processing, East China Normal University, Shanghai 200241, China)

Abstract: With the characteristics of small size, high frequency, wide band and high power capacity, the film bulk acoustic resonator (FBAR) filter meets the requirements of 5G communication systems for radio frequency (RF) filters, so it has become a research hotspot of RF filters. The FBAR filter is comprehensively expounded and studied including the structure principle, circuit topology, key materials and cavity process scheme. Firstly, the basic structure and working principle of FBAR is described, and two key parameters of the effective coupling coefficient k_{eff}^2 and quality factor Q are pointed out to measure the performance. Secondly, the circuit topology of the FBAR filter is summarized, and the characteristics of three circuit topology forms of Ladder form, Lattice form and Ladder-Lattice combination form are analyzed. Thirdly, the key materials of the FBAR filter, such as piezoelectric material and electrode material, are analyzed and compared. Fourthly, the cavity fabrication scheme of the FBAR filter is summarized, focusing on two types of silicon reverse etching type and air gap type, and comparison and discussion are offered. Finally, the further development of the FBAR filter is prospected.

Key words: MEMS; FBAR filter; circuit topology; key material; cavity structure scheme

EEACC: 1270D

doi: 10.3969/j.issn.1004-1699.2023.11.001

薄膜体声波谐振器 (FBAR) 滤波器研究*

廖俊杰¹, 冯耀刚¹, 万蔡辛², 蔡春华^{2,3}, 秦明¹, 张志强^{1*}

(1. 东南大学 MEMS 教育部重点实验室, 江苏南京 210096; 2. 上海韦尔半导体股份有限公司, 上海 201203;

3. 华东师范大学上海市多维度信息处理重点实验室, 上海 200241)

摘要: 薄膜体声波谐振器 (FBAR) 滤波器具有小尺寸、高频、宽频带、高功率容量等特点, 符合 5G 通信系统对射频滤波器的要求, 因而成为射频滤波器的研究热点。对 FBAR 滤波器的结构原理、电路拓扑形式、关键材料和空腔结构方案四个方面进行了综合阐述与研究。首先介绍了 FBAR 的基本结构, 描述了其工作原理, 并指出用于衡量性能优劣的两个关键参数——有效压电耦合系数 k_{eff}^2 和品质因数 Q 。然后概括了 FBAR 滤波器的电路拓扑形式, 并分析了 Ladder 形式、Lattice 形式和 Ladder-Lattice 组合形式三种电路拓扑形式的特点。随后研究了 FBAR 滤波器的关键材料——压电材料与电极材料, 并进行了性能特性的比较。其次总结了 FBAR 的空腔工艺制备方案, 重点关注硅反面刻蚀型与空气隙型两大类, 并给出了对比与讨论。最后对 FBAR 滤波器的进一步发展做出了展望。

关键词: MEMS; FBAR 滤波器; 电路拓扑形式; 关键材料; 空腔结构方案

中图分类号: TN713.5

文献标识码: A

文章编号: 1004-1699(2023)11-1669-12

第五代移动通信技术 (5th Generation Mobile Communication Technology, 5G) 正在蓬勃发展, 与 3G 和 4G 相比, 其数据传输速率、数据承载能力和频谱利用率均显著提高, 而通信协议却更为复杂^[1]。为满足不同场景的应用需求, 5G 通信系统已面向全频段布局。根据国际电信标准组织 3GPP (3rd Generation Partnership Project) 对 5G 频段的划分, 5G 通信系统包括了两大频段范围: Sub-6G 频段 (450 MHz ~ 6 GHz)、5G 毫米波频段 (24.25 GHz ~ 52.6 GHz)^[2]。5G 毫米波频段资源充足, 可缓解全球 Sub-6G 频段

资源枯竭而导致的频段拥挤问题, 但是在实际应用中存在能量损耗较大、覆盖面小等障碍, 从而限制其应用范围与效用。Sub-6G 频段具有较强的穿透力, 可兼顾 5G 通信系统的覆盖与容量, 并提供广域连续的通信网络。其中, 两个新定义的频带 N77 (3.3 GHz ~ 4.2 GHz) 和 N79 (4.4 GHz ~ 5 GHz) 具有宽频带, 可实现更高的数据传输速率, 因而是全球 5G 部署的核心频段。5G 通信系统工作在更高的频段, 也带来了频段的增加, 同时还需要充分利用碎片化频段的载波聚合和多输入多输出 (Multiple-Input

项目来源: 国家自然科学基金项目 (61604039); 至善青年学者支持计划项目 (2242019R40030)

收稿日期: 2022-06-20 修改日期: 2022-09-18

Multiple-Output, MIMO) 等技术应用, 这使射频前端器件的性能要求大幅提高, 器件数量需求也大幅提升^[3]。射频滤波器作为射频前端的重要组成部分, 5G 通信系统对其提出了微型化、低成本、高频率、宽频带、高功率容量以及其他高性能的迫切要求^[4]。声学滤波器凭借尺寸小、低成本和高性能的优势成为无线通信系统中主要的滤波器解决方案之一。其中声学滤波器可分为表面声波 (Surface Acoustic Wave, SAW) 滤波器和体声波 (Bulk Acoustic Wave, BAW) 滤波器^[5]。在 5G 通信技术之前, 通信系统的工作频段在 3 GHz 以下, SAW 滤波器凭借其尺寸更小、可靠性好、工艺成熟、制备成本更低等优点, 占据了声学滤波器的主导地位。然而当工作频率达到 3 GHz 或更高时, SAW 滤波器面临着插入损耗高、功率容量低、制造难度大等问题, 因此难以满足 5G 通信系统的要求^[6]。在这样的背景下, BAW 滤波器因工作频段较高而被广泛研究, 同时产生了巨大市场空间。BAW 滤波器主要分为两类: 一是基于薄膜体声波谐振器 (Film Bulk Acoustic Resonator, FBAR) 的 FBAR 滤波器, 二是基于固态装配型谐振器 (Solidly Mounted Resonator, SMR) 的 SMR-BAW 滤波器。与 SMR-BAW 滤波器相比, FBAR 滤波器具有更高的品质因数 Q 和有效压电耦合系数 k_{eff}^2 ^[7]。而与 SAW 滤波器相比, FBAR 滤波器在高频范围性能优越, 工作频率可达 20 GHz^[8]。随着微机电系统 (Micro-Electro-Mechanical System, MEMS) 技术的发展, 使得 FBAR 滤波器具有低功耗、高隔离度、高功率容量、与互补金属氧化物半导体 (Complementary Metal Oxide Semiconductor, CMOS) 工艺兼容等特点, 现已成为 5G 射频滤波器的研究热点^[9-10]。

1 FBAR 的结构、原理与性能参数

FBAR 是构成 FBAR 滤波器的基本单元。该 FBAR 的基本结构主要是由上下两层金属电极和在两个金属电极之间的压电材料组成的三明治结构; 其中, 谐振器的上表面和下表面直接与空气接触。因为空气的声阻抗近似为零, 所以空气可作为理想的声波反射层以使得声波发生全反射, 从而降低声能量的损失^[11]。在实际器件中, 为了保证器件的稳定性和可靠性, 通常在下电极的下方制备支撑层, 并在上电极的上方制备钝化层。值得注意的是, 支撑层、钝化层以及上述的三明治结构共同构成 FBAR 的谐振振荡区, 其谐振振荡区的厚度决定了 FBAR 的谐振频率。图 1 所示为 FBAR 的基本结构。根据支撑层下方的空气腔形成方式, FBAR 可分为硅反面刻

蚀型和空气间隙型两大类^[12-13]。

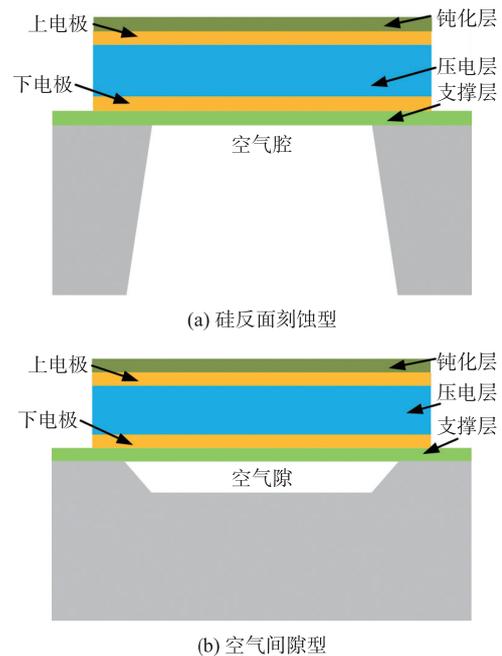


图 1 FBAR 的基本结构

图 2 所示为 FBAR 的声波激励和阻抗特性曲线^[11,14]。根据图 2(a) 所示, FBAR 的工作原理可描述为: 当在上电极和下电极施加特定频率的射频电压时, 中间的压电材料发生逆压电效应进而产生机械振动, 即射频电信号转换为声波信号, 所产生的声波信号沿压电层厚度方向传播, 由于谐振振荡区的上表面和下表面均与空气接触, 空气作为理想的声波反射层, 使声波发生全反射, 最终实现声波在谐振振荡区的两个空气接触界面之间发生来回反射, 从而形成声驻波并产生谐振。如图 2(b) 所示, FBAR 具有两个相隔很近的谐振频率: 一是串联谐振频率 f_s , 是指在一定频率的射频信号作用下, 其声驻波与

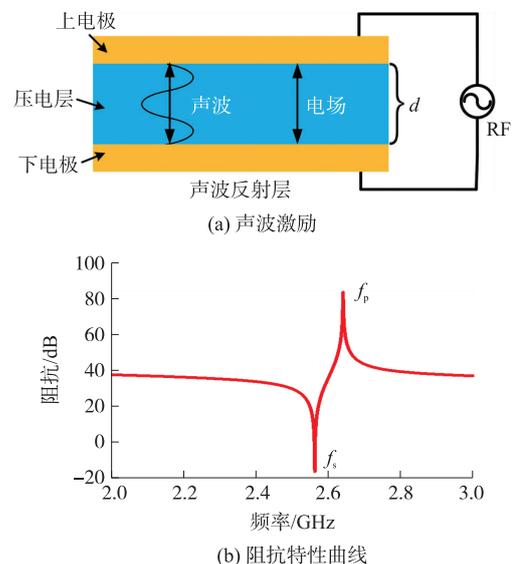


图 2 FBAR 的声波激励和阻抗特性曲线

内部电场同相位,声波在谐振振荡区产生串联谐振,此时谐振器的电学阻抗呈最小值;二是并联谐振频率 f_p ,是指若其声驻波与内部电场反相位,声波在谐振振荡区产生并联谐振,此时谐振器的电学阻抗呈最大值。

对于一个 FBAR 结构设计的性能优劣,一般通过有效压电耦合系数 k_{eff}^2 和品质因数 Q 两个关键参数衡量^[15-16]。 k_{eff}^2 为机械能和电能之间的转换比率,决定了 FBAR 滤波器的带宽。一般而言,大的 k_{eff}^2 可以满足 5G 通信系统中射频滤波器的宽频带要求,而 k_{eff}^2 的最佳值是所设计 FBAR 滤波器的相对带宽的两倍^[7]。 k_{eff}^2 的数值可以通过串联谐振频率 f_s 和并联谐振频率 f_p 得到,其表达式为^[17]:

$$k_{\text{eff}}^2 = \frac{\pi^2}{4} \times \frac{f_s}{f_p} \times \left(\frac{f_p - f_s}{f_p} \right)$$

Q 为在一个周期内电子器件的储存能量与消耗能量之比。它主要是由 FBAR 的损耗机制决定的,例如声波损耗等。一般而言,高的 Q 表明所构成的 FBAR 滤波器具有低插入损耗和高矩形度的特点。

2 FBAR 滤波器的电路拓扑形式

将多个 FBAR 结构通过特定的电学级联方式便可构成 FBAR 滤波器的电路拓扑形式。它主要包括三种电路拓扑形式:Ladder 形式、Lattice 形式与 Ladder-Lattice 组合形式^[18-20],如图 3 所示。Ladder 形式滤波器由多个串联 FBAR 和并联 FBAR 按照图 3(a)所示的方式级联形成;采用单端输入、单端输出,直接处理单端信号,具有矩形度高、设计灵活的优点,但缺点是带外抑制差。Lattice 形式滤波器由两个串联 FBAR 和两个并联 FBAR 交叉组成,如图 3(b)所示;采用差分端口输入输出,处理差分信号,具有带外抑制好、带宽更宽的优点,但缺点是矩形度低。Ladder-Lattice 组合形式滤波器是将 Ladder 形式转换成差分端口输入输出的形式后,再与 Lattice 形式组合形成的滤波器,如图 3(c)所示;采

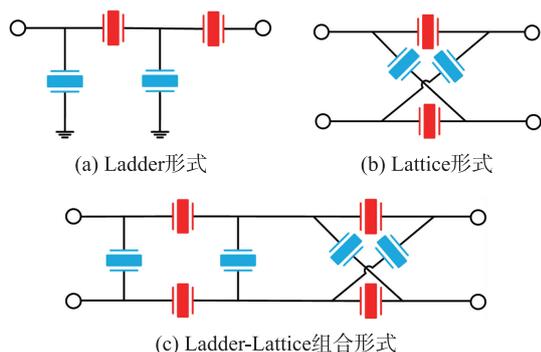


图 3 FBAR 滤波器的电路拓扑形式

用差分端口输入输出,处理差分信号,同时具备矩形度高、带外抑制好的优点。

表 1 给出了三种 FBAR 滤波器的电路拓扑形式的特性。

表 1 三种 FBAR 滤波器的电路拓扑形式特性比较

	Ladder 形式 ^[18-19]	Lattice 形式 ^[18-19]	Ladder-Lattice 组合形式 ^[20]
带外抑制	差	较好	好
矩形度	高	低	高
带宽	较窄	宽	宽
谐振器数量	少	较多	多
输入输出信号	单端信号	差分信号	差分信号

虽然 Ladder-Lattice 组合形式滤波器在性能上同时具备 Ladder 形式和 Lattice 形式的优点,使其在拥挤的 FR1 频段中不但具有优异的选频性能而且对无用频段实现高度隔离,但是其一方面需要较多的谐振器,不利于 FBAR 滤波器的微型化,另一方面需要进行单端-差分信号转换处理,这增加了额外的器件,不符合射频前端模块的小型化发展趋势。Lattice 形式滤波器具有良好的带外抑制,但是由于其矩形度低,并不适用于拥挤的 FR1 频段,并且与 Ladder-Lattice 组合形式滤波器一样,此类滤波器应用时需要引入额外的器件进行信号转换处理。Ladder 形式滤波器具有高矩形度的优点,可适用于拥挤的 FR1 频段,且直接处理单端信号,不需要引入额外器件。因此,目前 FBAR 滤波器的产品绝大部分是基于 Ladder 形式设计。值得注意的是,Ladder 形式滤波器具有带外抑制差的缺点。为此,在设计时通常对于 Ladder 形式 FBAR 滤波器的基本结构进行改进,从而在保持其他性能的情况下实现其良好的带外抑制。例如,Verdú 等^[21]在 Ladder 形式滤波器的基本结构上通过对并联谐振器增加串联电感或对串联谐振器增加并联电感,从而在滤波通带外形成一对新的有限传输零点,进而实现带外抑制的提高。为解决 FBAR 的 k_{eff}^2 无法满足宽频段 FBAR 滤波器的设计需求,Kreuzer 等^[22]通过在 Ladder 形式滤波器的输入和输出端口均增加并联电感,实现改善通带的插入损耗和反射损耗,从而设计出宽频段 FBAR 滤波器。在 5G 系统中 N77 和 N79 通信频段分别具 24% 和 12.7% 的相对带宽。为了实现这两个频段的全频段滤波器,一些新的 FBAR 滤波器电路拓扑形式被报道。Zuo 等^[23]提出了一种基于集成无源器件(Integrated Passive Device, IPD)和声学技术的混合形式 FBAR 滤波器,如图 4 所示。该滤波器通过 IPD 的电感和电容实现较宽的工作

带宽,通过声学谐振器实现较高的矩阵度。其中以 N77 频段滤波器为例,实现了带宽为 900 MHz 的通带两端的插入损耗分别为 -2.3 dB 和 -2.5 dB 且带外抑制为 -40 dB 的滤波器,证明这种滤波器可适用于 FR1 频段的 5G 通信系统。Bogner 等^[24]提出了一种基于无源全通网络的 FBAR 滤波器,如图 5 所示。其中以 N79 频段滤波器为例,证明该滤波器不仅满足 N79 频段的带宽要求,还满足与 N78 和 5G-WiFi 频段共存的要求。

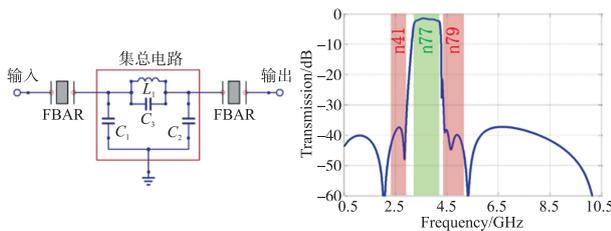


图 4 基于 IPD-声学技术的混合形式 FBAR 滤波器^[23]

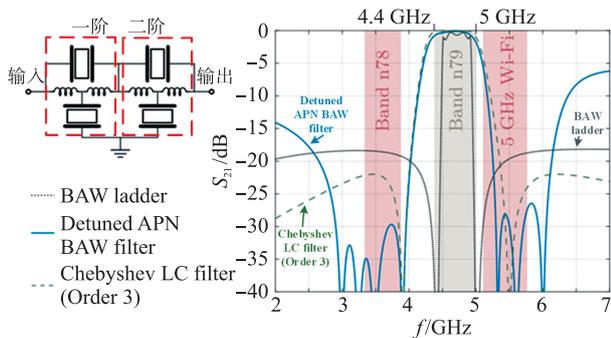


图 5 基于全通网络的 FBAR 滤波器^[24]

3 FBAR 滤波器的关键材料

3.1 压电材料

FBAR 的工作原理是由中间压电材料的逆压电效应将射频信号转换成声波,从而形成谐振,因而压电层是 FBAR 结构的核心组成部分。一般而言,在选择压电材料时需要考虑压电耦合系数 k^2 、纵向声速、相对介电常数、温度系数、固有损耗以及是否与 CMOS 工艺兼容等。压电材料的 k^2 决定了 FBAR 的 k_{eff}^2 大小,所以选用大 k^2 的压电材料进行设计可更容易实现 FBAR 滤波器的宽频带。纵向声速影响着 FBAR 的厚度,在谐振频率一定时,声速越低,则 FBAR 的厚度越薄。压电材料的相对介电常数与 FBAR 的尺寸(如上下电极的面积和压电层的厚度)共同决定了 FBAR 的静态电学阻抗;在相同的静态电学阻抗前提下,大的相对介电常数可以得到尺寸更小的 FBAR,从而更易实现 FBAR 滤波器的微型化。压电材料的温度系数反映了谐振频率随温度变化的漂移程度;在滤波器设计时,需将温度系数列入

通频带指标制定的考虑中,以减少温漂对 FBAR 滤波性能的影响。压电材料的固有损耗影响着 FBAR 的 Q 值;固有损耗越小, Q 值越大,从而使得由 FBAR 所构成的滤波器实现低的插入损耗和高的矩形度。

目前,FBAR 压电层的常见材料分别为 PZT、ZnO 和 AlN^[25-27]。表 2 比较了应用于 FBAR 的三种压电材料的特性。通过比较可知,PZT 具有最大的 k^2 ,但其固有损耗最大,纵向声速最低^[28];ZnO 的 k^2 也比 AlN 大,但其声速远比 AlN 慢^[29];此外,PZT 与 ZnO 的制备需要锌、铅和锆等金属材料,会引入额外掺杂进而影响器件的性能,并且其制备通常不与 CMOS 工艺兼容;而 AlN 不仅具有最高的声速、最小的压电材料固有损耗、较小的温度系数,而且其制备与 CMOS 工艺兼容,因而 AlN 是目前 FBAR 滤波器的常用压电材料^[30-31]。

表 2 应用于 FBAR 的三种压电材料特性比较

	PZT ^[27-28]	ZnO ^[26,29]	AlN ^[25,28-31]
压电耦合系数 $k^2/\%$	16~36	8.5	6.5
纵向声速/(m/s)	4 000~6 000	6 350	11 350
相对介电常数	80~556	9.2	9.5
温度系数/($10^{-6}/\text{K}$)	—	-60	-25
固有损耗	大	较小	小
与 CMOS 兼容性	不兼容	不兼容	兼容

为了获得高质量的压电材料薄膜,面向 FBAR 滤波器应用的 AlN 制备工艺被广泛研究。其中,为了实现良好的压电性能,AlN 薄膜的生长要求严格的 c 轴取向,即沿着(0002)晶面定向生长。AlN 薄膜的生长质量可通过(0002)晶面的 X 射线衍射的半峰宽(Full Width At Half Maxima, FWHM)来衡量^[32]。目前,应用于 FBAR 的 AlN 材料主要分为三种:多晶 AlN、单晶 AlN 和掺杂 AlN。

①多晶 AlN

FBAR 目前主要采用多晶 AlN 薄膜。基于多晶 AlN 的 FBAR 的 k_{eff}^2 可高达 6.5%~7.1%,并且其 Q 值约为 1 000^[33-34]。对于制备方面,磁控溅射是制备多晶 AlN 薄膜的最常用方案,通常在较低温度(200 °C~300 °C)下进行,反应过程中最高温度可达 400 °C~500 °C,这使得制备工艺与 CMOS 工艺兼容性更佳,并且可以在多种衬底上实现多晶 AlN 薄膜 c 轴择优取向生长;此外其还具有沉积效率高、成本低、沉积面积大等特点^[35-37]。为了生长高 c 轴取向的多晶 AlN 薄膜,需要为吸附原子提供足够的动能,这主要是由溅射压力控制的^[38]。需要值得注意的是,多晶 AlN 薄膜的晶体取向会受到其下方的金属电极、支撑层和衬底的影响。Matsumoto 等^[39]研

究了在相同溅射条件下分别在 Si、SiO₂ 和 AlN 衬底或支撑层上溅射 AlN/Mo 双层膜,如图 6 所示,其实验结果表明 AlN 支撑层显著提高了 Mo 膜的质量,在该 Mo 膜基础上制备的多晶 AlN 薄膜 c 轴取向最好,此时多晶 AlN (0002) 的 FWHM 为 2.3°。Kamohara 等^[40]研究了在不同溅射压力条件下 Si、Mo/Si 和 Mo/AlN/Si 衬底上制备的多晶 AlN 晶体取向和微观结构;其发现在 Si 衬底上制备的多晶 AlN 薄膜的晶体取向和微观结构对溅射压力具有很强的依赖性,而在 Mo/Si 和 Mo/AlN/Si 衬底上制备的多晶 AlN 薄膜的晶体取向和微观结构对溅射压力具有很弱的依赖性,即几乎不受溅射压力的影响。

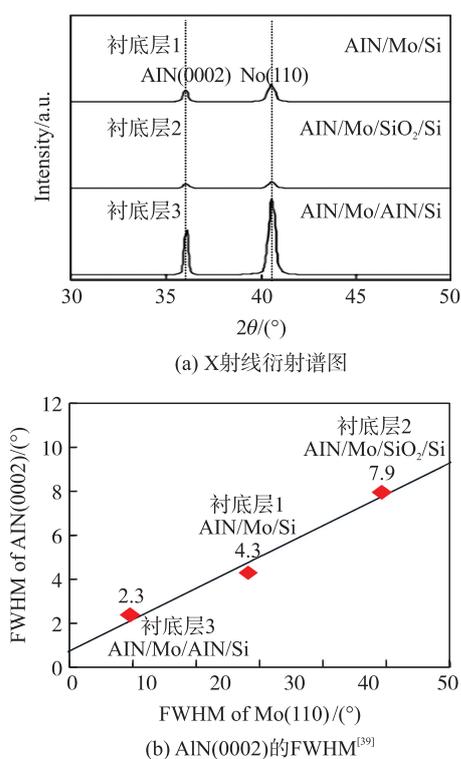


图 6 在 Si、SiO₂、AlN 衬底或支撑层上沉积 AlN/Mo 双层膜的 X 射线衍射谱图和 AlN(0002) 的 FWHM

②单晶 AlN

单晶 AlN 与多晶 AlN 相比,其(0002)晶面的 X 射线衍射的 FWHM 为 0.025°,并具有较高的晶体质量、较少的缺陷和更稳定的化学性质这有利于提高压电性能和声速,降低体声波的吸收或散射。据报道,基于单晶 AlN 的 FBAR 的 k_{eff}^2 为 7.63%,而其 Q 值为 858^[41]。此外,AlN 薄膜的热导率与其薄膜厚度密切相关,随着薄膜厚度的减小,热导率会下降,这决定了 FBAR 在更高频率下的功率处理能力^[42]。而单晶 AlN 因其更高的声速可使 FBAR 在相同频率下得到更厚的压电薄膜。因此,基于单晶 AlN 的 FBAR 滤波器具有比多晶 AlN 的 FBAR 滤波器更强的功率处理

能力。Vetury 等^[43]比较了由单晶 AlN 和多晶 AlN 制备的 BAW 滤波器的功率处理能力,其实验结果表明单晶 AlN 器件表现出比多晶 AlN 器件更强的功率处理能力。对于制备方面,单晶 AlN 薄膜一般采用金属有机化学气相沉积 (Metal-Organic Chemical Vapor Deposition, MOCVD) 方法制备,虽然所制备的单晶 AlN 薄膜具有更优的压电性能,但是该方法沉积速度慢、成本高、获取单晶 AlN 的面积通常较小^[44]。Shin 等^[45]提出了一种通过磁控溅射方式生长单晶 AlN 的方法。其方法表明为了保证单晶 AlN 的性能,在生长单晶 AlN 之前需要在衬底上预沉积 5 nm 厚 Al,并实验证明了在室温下通过磁控溅射在 Si 衬底上能够实现生长高质量的单晶 AlN。

③掺杂 AlN

基于多晶 AlN 的 FBAR 的 k_{eff}^2 为 6.5%~7.1%,这限制了实现 FBAR 滤波器的宽频带性能,进而难以满足 5G 系统中通信频段的应用需求。随着 AlN 压电材料研究的不断深入,发现将某些元素掺杂到 AlN 薄膜中可以显著地改善压电性能。其中,掺杂 Sc 元素 AlN 薄膜的研究最为广泛。ScAlN 薄膜一般可以通过双反应磁控溅射制备,其具有更高的 k^2 ,同时保持着较低的介电损耗^[46]。在 ScAlN 薄膜中,其压电性能随着在一定范围内的 Sc 含量增加而增加^[47]。Moreira 等^[48]分别基于三种不同 Sc 含量的 ScAlN 制备 FBAR。其中,Sc 含量为 3%时,FBAR 的 k_{eff}^2 为 7.55%, Q 值为 601;Sc 含量为 9%时,FBAR 的 k_{eff}^2 为 7.55%, Q 值为 513;Sc 含量为 15%时,FBAR 的 k_{eff}^2 为 12%, Q 值为 348。值得注意的是,基于 ScAlN 的 FBAR 通过增加 Sc 含量使 k_{eff}^2 增大时,其 Q 值也随之减小。此外,掺杂其他元素也可提高 AlN 的压电性能。Yokoyama 等^[49]报道了基于 Mg 元素和 Zr 元素共掺杂的 AlN 薄膜的 FBAR,其结果表明 k_{eff}^2 达到 8.5%, Q 值为 821;接着,研究了基于 Mg 元素和 Hf 元素共掺杂的 AlN 薄膜的 FBAR,其结果表明 k_{eff}^2 可达到 10%,而 Q 值为 781^[50]。

表 3 比较了基于多晶 AlN、单晶 AlN、掺杂 AlN 的 FBAR 的特性。基于多晶 AlN 的 FBAR 的 k_{eff}^2 较低,从而限制了 FBAR 滤波器的宽频带实现。与多晶 AlN 相比,基于单晶 AlN 的 FBAR 的 k_{eff}^2 相对较高,然而其 Q 值相对较小,并且单晶 AlN 的制备工艺较复杂。基于掺杂 AlN 的 FBAR 可通过选择掺杂元素和控制掺杂浓度以实现大的 k_{eff}^2 ,然而其 Q 值随着 k_{eff}^2 的增大而减小,并且其制备工艺要求较高。综上所述,基于单晶 AlN 和掺杂 AlN 的 FBAR 皆可实现更大的 k_{eff}^2 ,有利于实现应用于 5G 通信系统的宽频段 FBAR 滤波

器;但是作为滤波器基本单元的 FBAR 的 Q 值随着 k_{eff}^2 的增大而减小,进而使得 FBAR 滤波器的矩形度降低。因此在设计宽频段 FBAR 滤波器时,需要对 AlN 压电材料的选择进行综合性考虑。

表 3 基于多晶 AlN、单晶 AlN、掺杂 AlN 的 FBAR 特性比较

	多晶 AlN ^[33-40]	单晶 AlN ^[41-45]	掺杂 AlN ^[46-50]
有效压电耦合系数 k_{eff}^2 (%)	6.5-7.1	7.2-7.63	7.55-12
品质因数 Q	1000	837-858	348-821
制备工艺	简单	较复杂	复杂

3.2 电极材料

FBAR 的基本结构为由上电极—压电材料—下电极组成的三明治结构。因此,除了压电材料外,电极材料也对 FBAR 及其滤波器的性能具有重要影响。在选取电极材料时,需要考虑电极材料的电阻率、声阻抗、体密度以及与压电薄膜的晶格匹配程

度。电极材料的低电阻率可以减小电阻损耗,有助于降低 FBAR 滤波器的插入损耗。电极材料的高声阻抗可以使得声波能量尽可能地约束在 FBAR 的谐振振荡区内,以获得高的 k_{eff}^2 和 Q 值。电极材料的低密度可以更好实现高频率的 FBAR。如前面所述,压电材料的薄膜晶体取向受到下电极的影响,所以为了满足压电薄膜严格的 c 轴取向生长,下电极与压电薄膜的晶格匹配尤为重要。

目前,FBAR 主要采用 AlN 作为压电材料薄膜,可满足 AlN 薄膜严格的 c 轴取向生长要求的常用电极材料包括:Al、Mo、W、Pt、Ru^[51-56]。表 4 比较了基于 AlN 薄膜的 FBAR 常用电极材料的特性。相比于 Al 和 Pt,Mo、W 和 Ru 均具有较小的薄膜电阻和较高的声阻抗,因而更适合作为 FBAR 的电极材料。其中,W 和 Ru 的体密度均比 Mo 更大,且在 FBAR 的制备过程中 W 的应力控制比 Mo 复杂^[7]。因此,通常采用 Mo 作为 FBAR 滤波器的电极材料。

表 4 基于 AlN 薄膜的 FBAR 常用电极材料特性比较

	Al ^[51,55-56]	Mo ^[52,55-56]	W ^[53,55-56]	Pt ^[52,55-56]	Ru ^[54-56]
薄膜电阻/(Ω/\square)	0.10	0.33	0.48	1.20	0.46
声阻抗/($10^6 \text{ kg/m}^2\text{s}$)	17.7	63.1	101	69.0	73.4
体密度/(kg/m^3)	2 700	10 200	19 300	21 400	12 500

4 FBAR 的空腔结构方案

FBAR 正常工作的必要条件是,谐振振荡区的上下表面直接与空气接触,使射频电信号激励的声波被限制在谐振振荡区内来回反射,进而产生谐振。为了实现谐振振荡区的上下表面均与空气形成接触界面,在衬底上形成的空腔结构是 FBAR 不可或缺的组成部分。目前,FBAR 空腔结构的工艺制备方案主要分为两大类:一是从衬底背面刻蚀空腔结构的硅反面刻蚀型结构,二是从衬底正面制备空腔结构的空气间隙型结构。其中,每一大类又有两种不同的构成方式。对此,MEMS 技术的出现使高性能的 FBAR 及其滤波器的发展成为可能^[57]。

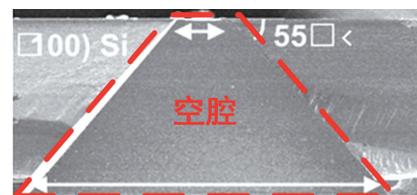
4.1 硅反面刻蚀型

从衬底背面刻蚀空腔结构的硅反面刻蚀型结构根据形成方式主要包括两种:各向异性湿法刻蚀和深反应离子刻蚀(Deep Reactive Ion Etching, DRIE)。其主要依赖于 MEMS 体微加工技术。图 7 为硅反面刻蚀型结构的扫描电子显微镜(Scanning Electron Microscope, SEM)图。

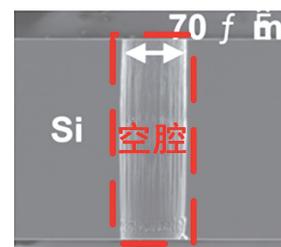
早期 FBAR 主要为通过背面刻蚀空腔结构工艺实现的硅反面刻蚀型结构,其制备空腔方法为各向异性湿法刻蚀^[58-60]。该工艺从硅衬底的背面沿

$\langle 100 \rangle$ 方向快速蚀刻,直到刻蚀停止在 SiO_2 或 $p+$ 层,但是沿 $\langle 111 \rangle$ 方向却缓慢蚀刻,进而留下 $\langle 111 \rangle$ 方向的四壁,从而得到外形类似金字塔形状的空腔结构,称为金字塔型空腔结构,如图 7(a)所示。

DRIE 是 FBAR 背腔制备的另一种方法,其特点是可以形成侧壁几乎垂直于器件底面的空腔结构。DRIE 与各向异性湿法刻蚀相比可减少背腔的面积,从而提高器件的空间利用率和缩小器件的尺寸。



(a) 各向异性湿法刻蚀空腔



(b) DRIE空腔^[61]

图 7 从衬底背面刻蚀空腔结构的硅反面刻蚀型结构的 SEM 图

Nishihara 等^[61]提出一种利用 DRIE 工艺制备的 FBAR 结构,其结果表明空腔结构能够垂直通过硅衬底,以背面腐蚀的方式实现了具有陡峭垂直侧壁的空腔结构,如图 7(b)所示。

图 8 所示为基于硅反面刻蚀型 FBAR 的工艺流程。首先选用取向 $\langle 100 \rangle$ 硅晶圆作为衬底,通过热氧化在晶圆上生长一层 SiO_2 层,将硅衬底正面的 SiO_2 层作为刻蚀停止层和 FBAR 的支撑层;对于制备的 FBAR 谐振振荡区,自下往上依次为支撑层、下电极、压电层、上电极和钝化层;最后进行空腔结构的刻蚀,从硅衬底的背面通过采用各向异性湿法刻蚀工艺得到金字塔型空腔结构,或者通过采用 DRIE 工艺得到陡峭垂直侧壁的空腔结构。

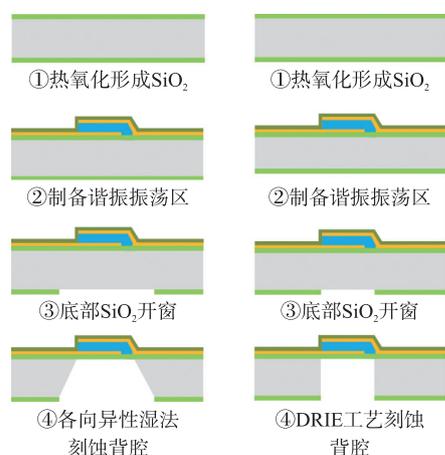


图 8 基于硅反面刻蚀型 FBAR 的工艺流程

在 DRIE 工艺过程中,为了保证 SiO_2 层下方硅衬底完全被去除掉,通常会发生衬底的过刻蚀,从而损失掉一部分 SiO_2 层。为了解决 DRIE 工艺中过刻蚀 SiO_2 层的问题,高杨等^[62]提出了一种基于绝缘衬底上的硅 (Silicon On Insulator, SOI) 圆片制备 FBAR 的空腔结构组合刻蚀方法。在 SOI 片上形成 FBAR 的谐振振荡区后,从硅衬底的背面先采用 DRIE 工艺刻蚀掉底层硅,在刻蚀至 SiO_2 埋氧层时,再换用刻蚀速率较低的反应离子刻蚀 (Reactive Ion Etching, RIE) 工艺,由此更容易控制刻蚀时间,从而尽可能减少 SOI 片中 Si 器件层正面的 SiO_2 层的损失,其工艺流程如图 9 所示。

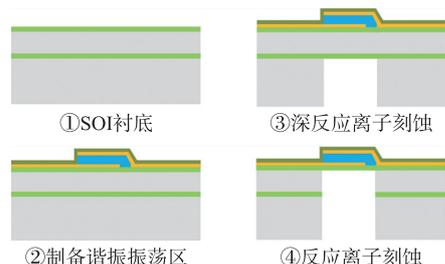


图 9 基于 SOI 圆片上硅反面刻蚀型 FBAR 的工艺流程

4.2 空气间隙型

从衬底正面制备空腔的空气间隙型结构根据形成位置主要包括两种:上凸空气间隙型和下沉空气间隙型。其主要依赖于 MEMS 表面微加工技术。

早期 FBAR 通过各向异性刻蚀工艺制备空腔结构。然而这种空腔结构比实际谐振面积大得多,其面积大小与衬底的厚度有关。这在实际中引起了许多的问题,其一这种过大的空腔结构造成了芯片面积的浪费,显著降低了每片晶圆上 FBAR 或其滤波器的数量,在一定程度上提高了制备成本;其二对于 FBAR 集成到有源电路时,在刻蚀过程增加了损坏如晶体管等外部器件和电路的风险,这显然不利于芯片的集成化;其三由于 FBAR 的谐振振荡区仅靠衬底边缘支撑,这导致了其结构的稳定性一般。基于上述诸多不足,通过表面微加工技术制备的空气间隙型 FBAR 被提出。因其采用了表面微加工技术,无需对硅衬底的背面进行加工,所以该技术与 CMOS 工艺兼容性更佳。

基于上凸空气间隙型 FBAR 是一种在硅衬底的正面和和谐振振荡区的下表面之间具有薄的空气间隙的结构。首先在硅晶圆的正面制备一层牺牲层,然后依次制备支撑层、下电极、压电层、上电极和钝化层,完成 FBAR 谐振振荡区的制备,最后通过释放孔将牺牲层去掉形成空气间隙,其工艺流程如图 10 所示。

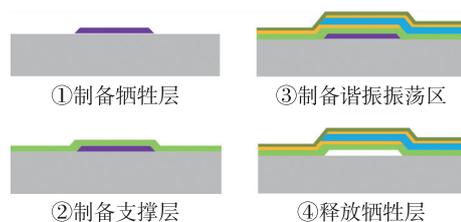


图 10 基于上凸空气间隙型 FBAR 的工艺流程

Sato 等^[63]报道了一种基于非压电 ZnO 牺牲层的上凸空气间隙型 FBAR。一方面以非压电 ZnO 作为牺牲层,采用 HCl 溶液通过侧壁的释放孔去掉牺牲层;另一方面,为了防止压电层 ZnO 薄膜被刻蚀损伤,同时防止残余应力引起的变形或裂纹,空气间隙需要非常薄,实验表明空气间隙的高度为 $1\ 000\ \text{\AA}$,可满足要求。此外,FBAR 的牺牲层材料还可以为 Mg 、 Ge 、掺磷硅玻璃等^[64-66]。

Taniguchi 等^[67]提出了一种通过控制薄膜应力形成圆顶状的上凸空气间隙型 FBAR。其制备流程如下:在硅晶圆上首先依次形成牺牲层、下电极、压电层和上电极,并通过控制溅射条件对谐振振荡区施加压应力,然后去除牺牲层。在 FBAR 的谐振振

荡区的压应力作用下,谐振振荡区的结构会向上翘曲,从而形成一个圆顶状的空气间隙,以减少在牺牲层消除时谐振振荡区结构与衬底发生粘连的风险,如图 11 所示。

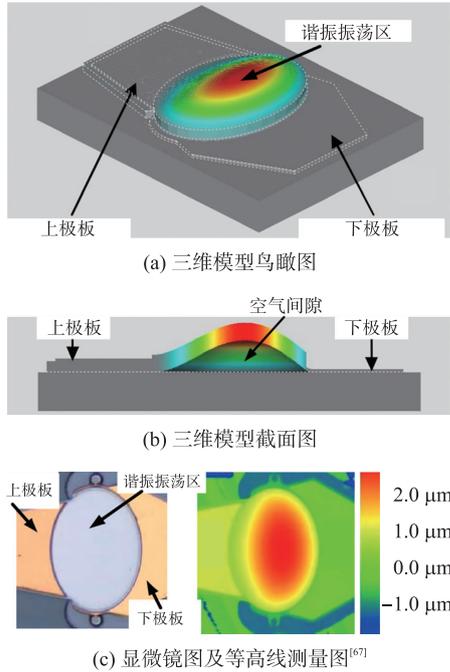


图 11 基于圆顶状的上凸空气间隙型 FBAR^[67]

下沉空气间隙型 FBAR 的空气间隙与上凸空气间隙型 FBAR 的空气间隙的位置与制备方式均不同。对于下沉空气隙型 FBAR,在制备谐振振荡区之前,首先通过采用体刻蚀微加工技术在硅晶圆的正面刻蚀出空腔,然后填充一层牺牲层,再采用化学机械抛光 (Chemical Mechanical Polishing, CMP) 去除多余牺牲层且使得表面光滑,以保证后面生长膜层的表面粗糙度,接着进行谐振振荡区的制备,最后刻蚀释放孔,并且通过释放孔去除掉牺牲层,从而形成空腔结构,如图 12 所示。Kim 等^[68]开发了一种基于多孔硅牺牲层的 ZnO/Si 复合薄膜结构的 FBAR。其中,多孔硅牺牲层采用选择性阳极反应制备,采用 2% NaOH 溶液可以去除多孔硅牺牲层,从而形成空腔结构。

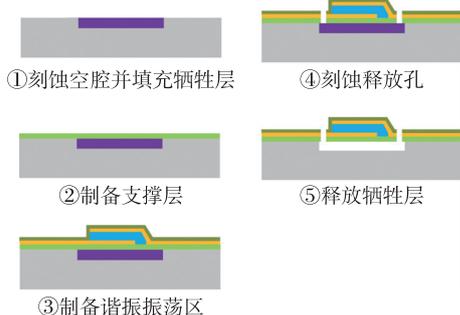


图 12 基于下沉空气间隙型 FBAR 的工艺流程

华迪等^[69]提出了一种基于单晶硅外延封腔工艺的下沉空气间隙型 FBAR。其制备流程如图 13 所示:首先选取单晶硅衬底,采用 RIE 工艺在衬底上刻蚀浅槽,然后在保护浅槽侧壁的同时对衬底进行各向同性腐蚀,再外延生长单晶硅,使得衬底的内部形成密封的空腔结构,随后在包含封闭的空腔结构的硅衬底上制备 FBAR 的其他结构层。该工艺方案可实现 FBAR 器件具有良好的机械能、高稳定性,并且与后续电路兼容。

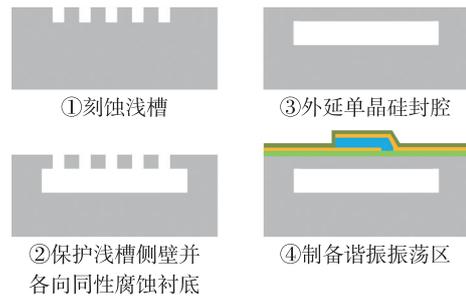


图 13 基于单晶硅外延封腔工艺的下沉空气间隙型 FBAR 的工艺流程

董树荣等^[70]提出了一种基于高空隙率多孔硅的下沉空气间隙型 FBAR。其通过高温退火使多孔硅发生高温迁移,形成硅薄膜和空腔结构,如图 14 所示。该空腔结构方案的特点是无需长时间腐蚀牺牲层,可有效地解决传统空气隙型结构存在的去除牺牲层时间长、结构层易破坏、器件成品率低等问题。

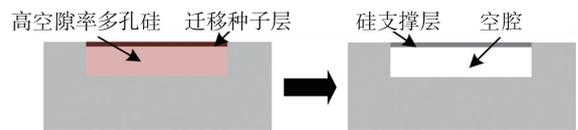


图 14 通过多孔硅高温迁移形成的薄膜与空腔

表 5 所示为硅反面刻蚀型和空气间隙型 FBAR 的比较。早期硅反面刻蚀型 FBAR 的空腔结构是通过各向异性湿法刻蚀制备的,最终形成外形像金字塔的空腔结构。但是,这种 FBAR 结构的背腔区域面积比实际谐振区域面积大得多,从而导致大的 FBAR 器件面积。此外,由于大面积的硅衬底被去除,导致这种 FBAR 的结构稳定性一般。DRIE 工艺制备的硅反面刻蚀型 FBAR 具有陡峭垂直侧壁的空腔结构,可实现更小面积尺寸的 FBAR 器件。空气间隙型 FBAR 不需要去除大部分硅衬底,故其结构稳定性与硅反面刻蚀型 FBAR 相比要好很多。由于这类 FBAR 直接在晶圆衬底的正面进行制备空腔结构,不需要对衬底的反面进行加工,使其与 CMOS 工艺兼容性更好。其中,下沉空气间隙型 FBAR 为保证填充牺牲层上生长的膜层的表面粗糙度,需引入

体刻蚀微加工技术在硅衬底上刻蚀出空腔和 CMP 工艺对晶圆表面进行抛光,因此增加了工艺流程的复杂性。相比之下,上凸空气间隙型 FBAR 直接在

硅衬底上制备空气间隙,无需预先采用体刻蚀微加工技术在硅衬底上刻蚀出空腔并填充牺牲层,免除了 CMP 工艺步骤,因此工艺制备流程相对简单。

表 5 基于硅反面刻蚀型和空气间隙型 FBAR 的比较

	硅反面刻蚀型(各向异性湿法刻蚀) ^[58-60]	硅反面刻蚀型(DRIE 工艺) ^[61-62]	上凸空气间隙型 ^[63-67]	下沉空气间隙型 ^[68-70]
结构稳定性	一般	一般	强	强
器件面积	大	较小	小	小
工艺流程	简单	较复杂	较复杂	复杂
CMOS 兼容性	一般	一般	好	好

5 展望

全球 5G 通信系统的核心频段集中在 N77 和 N79 频段,其与过去 4G 通信系统相比对射频滤波器提出了更高的工作频率和更宽的工作带宽等性能要求。目前,SAW 滤波器在通信系统中依然是主要的射频滤波器的解决方案,但是当通信系统的工作频段发展到 3 GHz 以上,SAW 滤波器因性能瓶颈挣扎在 2.5 GHz 而难以适用,因而满足更高工作频率的 FBAR 滤波器的发展势在必行。

在 FBAR 滤波器的电路拓扑形式方面,Ladder 形式是目前 FBAR 滤波器的主要路拓扑形式。为了满足通信系统的性能要求,FBAR 滤波器在设计中可通过在并联谐振支路串联电感以及在输入和输出端并联电感的方式改善带外抑制和拓宽工作带宽。此外,为了满足 N77 和 N79 频段滤波器的性能,一些新的电路拓扑形式被提出,例如基于 IPD 和声学技术的混合形式 FBAR 滤波器、基于全通带网络的 FBAR 滤波器等。事实上,无论是 Ladder 形式,还是新的电路拓扑形式,在设计滤波器时都涉及到 FBAR 与无源器件或电路的结合。因此,基于 FBAR 与无源器件或电路结合的滤波器结构,将是 5G 时代下 FBAR 滤波器实现更高性能的重要发展方向。

在 FBAR 滤波器的压电材料和电极材料方面,压电层作为 FBAR 的核心组成部分,其压电材料的选择对 FBAR 滤波器的性能影响显著。多晶 AlN 作为 FBAR 的主要压电材料薄膜,其 k^2 难以满足 5G 通信系统对宽通带滤波器的要求。因而,为了实现压电材料具有更高的 k^2 ,单晶 AlN 和掺杂 AlN 成为研究热点。其中掺杂 AlN 可通过选择掺杂元素和控制掺杂浓度来得到高 k^2 的压电材料。此外,相比于基于单晶 AlN 的 FBAR,基于掺杂 AlN 的 FBAR 通常具有较高的 k_{eff}^2 ,从而设计出具有更宽的工作带宽的 FBAR 滤波器。因此,通过掺杂 AlN 在 5G 时代下 FBAR 滤波器实现宽频段中具有巨大的应用潜力。

在 FBAR 滤波器的空腔结构制备方案方面,空腔结构作为 FBAR 的关键组成部分,其制备方案是整个 FBAR 滤波器制备流程的关键技术。根据空腔制备方案不同,FBAR 主要分为硅反面刻蚀型和空气间隙型。其中,空气间隙型 FBAR 具有更高的结构稳定性,能更好地满足 FBAR 滤波器性能要求。此外,其制备工艺与 CMOS 兼容性好,符合当前射频前端集成化的发展趋势。因此,空气间隙型 FBAR 有望成为构建 FBAR 滤波器的最广泛应用类型。

FBAR 滤波器作为在 5G 通信系统中射频前端滤波器的最优解决方案之一,将持续受到广泛关注与深入研究。伴随着新的电路拓扑形式、新的结构层材料和新的空腔结构制备方案的涌现,可以期待 FBAR 滤波器将更好地满足 5G 通信系统性能要求,并且实现巨大的应用与市场价值。

6 结论

本文对 FBAR 滤波器的结构原理、电路拓扑形式、核心关键材料和空腔结构方案四个方面进行了详细的综合阐述与研究。首先介绍了 FBAR 的基本结构、描述了其工作原理,并指出用于衡量性能优劣的关键参数。然后概括了 FBAR 滤波器的电路拓扑形式,并对其应用特点进行分析。随后研究了 FBAR 滤波器的关键材料,并进行了性能特性的比较。其次总结了 FBAR 的空腔结构制备方案,并给出了对比与讨论。最后对 FBAR 滤波器的进一步发展做出了展望。本文对 FBAR 滤波器的综述研究有助于今后 FBAR 滤波器的进一步发展,同时为研究其他类似器件提供了技术方法。

参考文献:

- [1] Gohil A, Modi H, Patel S K. 5G Technology of Mobile Communication: A Survey [C]//2013 International Conference on Intelligent Systems and Signal Processing (IS-SP). Vallabh Vidyanagar, India, 2013:288-292.
- [2] 付有奇,刘琪. 全球 5G 毫米波频段频率规划与许可进

- 展[J]. 通信世界, 2021(18):14-16.
- [3] 贺军,高怡平. 5G时代的射频前端技术分析[J]. 集成电路应用, 2017, 34(12):68-71.
- [4] Aigner R, Fattinger G. 3G-4G-5G: How BAW Filter Technology Enables A Connected World[C]//2019 20th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems & Eurosensors XXXIII (TRANSDUCERS & EUROSENSORS XXXIII). Berlin, Germany, 2019: 523-526.
- [5] Ruppel C C W. Acoustic Wave Filter Technology—A Review[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2017, 64(9):1390-1400.
- [6] Mahon S. The 5G Effect on RF Filter Technologies[J]. IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing, 2017, 30(4):494-499.
- [7] Ruby R. 11E-2 Review and Comparison of Bulk Acoustic Wave FBAR, SMR Technology [C]//2007 IEEE Ultrasonics Symposium Proceedings. New York, NY, USA, 2007:1029-1040.
- [8] Lakin K M, Belsick J R, McDonald J P, et al. Bulk Acoustic Wave Resonators and Filters for Applications Above 2 GHz[C]//2002 IEEE MTT-S International Microwave Symposium, Seattle, WA, USA, 2002, 3: 1487-1490.
- [9] Weigel R, Morgan D P, Owens J M, et al. Microwave Acoustic Materials, Devices, and Applications [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2002, 50(3):738-749.
- [10] Ruby R. A Snapshot in Time: The Future in Filters for Cell Phones [J]. IEEE Microwave Magazine, 2015, 16(7):46-59.
- [11] 金浩. 薄膜体声波谐振器(FBAR)技术的若干问题研究[D]. 杭州:浙江大学, 2006.
- [12] Krishnaswamy S V, Rosenbaum J, Horwitz S, et al. Film Bulk Acoustic Wave Resonator Technology [C]//1990 IEEE Symposium on Ultrasonics. Honolulu, HI, USA, 1990:529-536.
- [13] Ruby R, Bradley P, Larson J, et al. Ultra-Miniature High-Q Filters and Duplexers Using FBAR Technology [C]//2001 IEEE International Solid-State Circuits Conference, San Francisco, CA, USA, 2001:120-121.
- [14] Hashimoto K. RF Bulk Acoustic Wave Filters for Communications[M]. Norwood, MA, USA: Artech House, 2009: 52-58.
- [15] Lakin K M, Belsick J, McDonald J F, et al. Improved Bulk Wave Resonator Coupling Coefficient for Wide Bandwidth Filters [C]//2001 IEEE Ultrasonics Symposium. Proceedings. An International Symposium, Atlanta, GA, USA, 2001, 1:827-831.
- [16] Lakin K M, Kline G R, McCarron K T. High-Q Microwave Acoustic Resonators and Filters [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1993, 41(12): 2139-2146.
- [17] Bi F Z, Barber B P. Bulk Acoustic Wave RF Technology [J]. IEEE Microwave Magazine, 2008, 9(5):65-80.
- [18] Shirakawa A A, Pham J M, Jarry P, et al. Design of FBAR Filters at High Frequency Bands [J]. International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering, 2007, 17(1):115-122.
- [19] Yang Q, Pang W, Zhang D, et al. A Modified Lattice Configuration Design for Compact Wideband Bulk Acoustic Wave Filter Applications [J]. Micromachines, 2016, 7(8):133.
- [20] Shirakawa A A, Pham J M, Jarry P, et al. A High Isolation and High Selectivity Ladder-Lattice BAW-SMR Filter [C]//2006 European Microwave Conference, Manchester, UK, 2006:905-908.
- [21] Verdú J, Menendez O, De Paco P. Ladder-Type Filter Based on Bulk Acoustic Wave Resonators with Improved Out-of-Band Rejection [J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2008, 50(1):103-107.
- [22] Kreuzer S, Volatier A, Fattinger G, et al. Full band 41 Filter with High Wi-Fi Rejection-Design and Manufacturing Challenges [C]//2015 IEEE International Ultrasonics Symposium(IUS), Taipei, China, 2015:1-4.
- [23] Zuo C, He C, Cheng W, et al. Hybrid Filter Design for 5G Using IPD and Acoustic Technologies [C]//2019 IEEE International Ultrasonics Symposium(IUS), Glasgow, UK, 2019:269-272.
- [24] Bogner A, Bauder R, Timme H J, et al. All-Pass Based Filter Design Using BAW Resonators [C]//2019 IEEE International Ultrasonics Symposium(IUS), Glasgow, UK, 2019:1685-1688.
- [25] Loebel 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.
- [26] Yamada H, Ushimi Y, Takeuchi M, et al. Improvement of Crystallinity of ZnO Thin Film and Electrical Characteristics of Film Bulk Acoustic Wave Resonator by Using Pt Buffer Layer-Science Direct [J]. Vacuum, 2004, 74(3-4):689-692.
- [27] 刘燕翔,任天令,刘理天. PZT材料在射频滤波器中的应用 [J]. 固体电子学研究进展, 2002, 22(2):149-152, 184.
- [28] Lobl H P, Klee M, Wunnicke O, et al. Piezo-Electric AlN and PZT Films for Micro-Electronic Applications [C]//1999 IEEE Ultrasonics Symposium, Tahoe, NV, USA, 1999, 2:1031-1036.
- [29] Loebel H P, Metzmacher C, Milsom R F, et al. RF Bulk Acoustic Wave Resonators and Filters [J]. Journal of Electroceramics, 2004, 12(1-2):109-118.
- [30] Aigner R. MEMS in RF Filter Applications: Thin-Film Bulk Acoustic Wave Technology [J]. Sensors Update,

- 2003,12(1):175-210.
- [31] Yokoyama T, Nishihara T, Taniguchi S, et al. New Electrode Material for Low-Loss and High-Q FBAR Filters [C]//2004 IEEE Ultrasonics Symposium, Montreal, QC, Canada, 2004, 1:429-432.
- [32] Naik R S, Lutsky J J, Reif R, et al. Measurements of the Bulk, C-axis Electromechanical Coupling Constant as a Function of AlN Film Quality[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2000, 47(1):292-296.
- [33] Ruby R. FBAR-From Technology Development to Production [C]//Second International Symposium on Acoustic Wave Devices for Future Mobile Communication Systems, Chiba, Japan, 2004: 135-139.
- [34] Wang L P, Ginsburg E, Gerfers F, et al. Sputtered AlN Thin Films for Piezoelectric MEMS Devices [C]//2006 IEEE SENSORS, Daegu, South Korea, 2006:10-13.
- [35] Bhugra H, Piazza G. Piezoelectric MEMS Resonators [M]. Cham, Switzerland: Springer International Publishing Switzerland, 2017:9-17.
- [36] Naik R S, Lutsky J J, Reif R, et al. Measurements of the Bulk, C-Axis Electromechanical Coupling Constant as a Function of AlN Film Quality[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2000, 47(1):292-296.
- [37] 韩东, 胡顺欣, 冯彬, 等. Si 基薄膜体声波谐振器 (FBAR) 技术研究[J]. 半导体技术, 2012, 37(6):456-459, 469.
- [38] Iriarte G F, Engelmark F, Katardjiev I V. Reactive Sputter Deposition of Highly Oriented AlN Films at Room Temperature[J]. Journal of materials research, 2002, 17(6): 1469-1475.
- [39] Matsumoto H, Asai K, Kobayashi N, et al. Influence of Underlayer Materials on Preferred Orientations of Sputter-Deposited AlN/Mo Bilayers for Film Bulk Acoustic Wave Resonators [J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2004, 43(12):8219-8222.
- [40] Kamohara T, Akiyama M, Kuwano N. Influence of Molybdenum Bottom Electrodes on Crystal Growth of Aluminum Nitride Thin Films [J]. Journal of Crystal Growth, 2008, 310(2):345-350.
- [41] Shealy J B, Vetry R, Gibb S R, et al. Low Loss, 3.7 GHz Wideband BAW Filters, Using High Power Single Crystal AlN-on-SiC Resonators [C]//2017 IEEE MTT-S International Microwave Symposium (IMS), Honolulu, HI, USA, 2017:1476-1479.
- [42] Choi S R, Kim D, Choa S H, et al. Thermal Conductivity of AlN and SiC Thin Films [J]. International Journal of Thermophysics, 2006, 27(3):896-905.
- [43] Vetry R, Hodge M D, Shealy J B. High Power, Wideband Single Crystal XBAW Technology for sub-6 GHz Micro RF Filter Applications [C]//2018 IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS), Kobe, Japan, 2018:206-212.
- [44] Wang W, Yang W, Liu Z, et al. Epitaxial Growth of Homogeneous Single-Crystalline AlN Films on Single-Crystalline Cu (1 1 1) Substrates [J]. Applied Surface Science, 2014, 294:1-8.
- [45] Shin I S, Kim J, Lee D, et al. Epitaxial Growth of Single-Crystalline AlN Layer on Si(111) by DC Magnetron Sputtering at Room Temperature [J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2018, 57(6):060306.
- [46] Wingqvist G, Tasnadi F, Zukauskaitė A, et al. Increased Electromechanical Coupling in w-Sc x Al 1-x N [J]. Applied Physics Letters, 2010, 97(11):112902.
- [47] Teshigahara A, Hashimoto K, Akiyama M. Scandium Aluminum Nitride: Highly Piezoelectric Thin Film for RF SAW Devices in Multi GHz Range [C]//2012 IEEE International Ultrasonics Symposium, Dresden, Germany, 2012:1-5.
- [48] Moreira M A, Bjurström J, Yantchev V, et al. Synthesis and Characterization of Highly c-Textured Al(1-x)Sc(x)N Thin Films in View of Telecom Applications [J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2012, 41(1):012014.
- [49] Yokoyama T, Iwazaki Y, Onda Y, et al. Effect of Mg and Zr Co-Doping on Piezoelectric AlN Thin Films for Bulk Acoustic Wave Resonators [J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2014, 61(8):1322-1328.
- [50] Yokoyama T, Iwazaki Y, Onda Y, et al. Highly Piezoelectric Co-Doped AlN Thin Films for Wideband FBAR Applications [J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2015, 62(6):1007-1015.
- [51] Shih W C, Chen Y C, Cheng C C, et al. Simulation of Solidly Mounted Resonator Using Mason Model and Its Implementation [J]. Sensors and Materials, 2017, 29(4):405-410.
- [52] Lin Y C, Hong C R, Chuang H A. Fabrication and Analysis of ZnO Thin Film Bulk Acoustic Resonators [J]. Applied Surface Science, 2008, 254(13):3780-3786.
- [53] Olsson R H, Fleming J G, El-Kady I F, et al. Micromachined Bulk Wave Acoustic Bandgap Devices [C]//Transducers 2007—2007 International Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems Conference, Lyon, France, 2007:317-321.
- [54] Nor N I M, Shah K, Singh J, et al. Film Bulk Acoustic Wave Resonator (FBAR) Filter for Ku-Band Transceiver [C]//2013 NSTI Nanotechnology Conference and Expo (NSTI-Nanotech 2013), Washington, DC, USA, 2013, 2:169-172.
- [55] Ueda M, Nishihara T, Taniguchi S, et al. Film Bulk Acoustic Resonator Using High-Acoustic-Impedance Electrodes [J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2007, 46(7S):4642.

- [56] Kaitila J. 3C-1 Review of Wave Propagation in BAW Thin Film Devices-Progress and Prospects [C]//2007 IEEE Ultrasonics Symposium, New York, NY, USA, 2007: 120-129.
- [57] Petersen K E. Silicon as a Mechanical Material[J]. Proceedings of the IEEE, 1982, 70(5): 420-457.
- [58] Grudkowski T W, Black J F, Reeder T M, et al. Fundamental-Mode VHF/UHF Miniature Acoustic Resonators and Filters on Silicon[J]. Applied Physics Letters, 1980, 37(11): 993-995.
- [59] Lakin K M. Acoustic Bulk Wave Composite Resonators [J]. Applied Physics Letters, 1981, 38(3): 125-127.
- [60] Kitayama M, Fukuichi T, Shiosaki T, et al. VHF/UHF Composite Resonator on a Silicon Substrate[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 1983, 22(S3): 139-141.
- [61] Nishihara T, Yokoyama T, Miyashita T, et al. High Performance and Miniature Thin Film Bulk Acoustic Wave Filters for 5 GHz [C]//2002 IEEE Ultrasonics Symposium, Munich, Germany, 2002, 1: 969-972.
- [62] 高杨, 蔡洵, 贺学锋. 体声波滤波器设计与微加工方法[J]. 压电与声光, 2017, 39(2): 157-162.
- [63] Satoh H, Ebata Y, Suzuki H, et al. An Air-Gap Type Piezoelectric Composite Thin Film Resonator [C]//39th Annual Symposium on Frequency Control. Philadelphia, PA, USA, 1985: 361-366.
- [64] Kim E K, Lee T Y, Jeong Y H, et al. Air Gap Type Thin Film Bulk Acoustic Resonator Fabrication Using Simplified Process [J]. Thin Solid Films, 2006, 496(2): 653-657.
- [65] Hara M, Kuypers J, Abe T, et al. MEMS Based Thin Film 2 GHz Resonator for CMOS Integration [C]//IEEE MTT-S International Microwave Symposium, Philadelphia, PA, USA, 2003, 3: 1797-1800.
- [66] Lanz R, Carazzetti P, Muralt P. Surface Micromachined BAW Resonators Based on AlN [C]//2002 IEEE Ultrasonics Symposium, Munich, Germany, 2002, 1: 981-983.
- [67] Taniguchi S, Yokoyama T, Iwaki M, et al. 7E-1 an Air-Gap Type FBAR Filter Fabricated Using a Thin Sacrificed Layer on a Flat Substrate [C]//2007 IEEE Ultrasonics Symposium, New York, NY, USA, 2007: 600-603.
- [68] Kim S H, Lee J S, Choi H C, et al. The Fabrication of Thin-Film Bulk Acoustic Wave Resonators Employing a ZnO/Si Composite Diaphragm Structure Using Porous Silicon Layer Etching [J]. IEEE Electron Device Letters, 1999, 20(3): 113-115.
- [69] 华迪, 蔡春华, 齐本胜, 等. FBAR 谐振器及其制备方法: CN106130498A [P], 2016-11-16.
- [70] 董树荣, 卢雷贺, 骆季奎, 等. 一种基于多孔硅的自支撑空气隙型体声波谐振器及其制备方法: CN112073025A [P], 2020-12-11.



廖俊杰 (1997—), 男, 硕士研究生, 东南大学微电子学院, 电子信息专业; 主要研究方向为 RF MEMS 器件;



冯耀刚 (1999—), 女, 硕士研究生, 东南大学微电子学院, 电子信息专业; 主要研究方向为 RF MEMS 器件;



万蔡辛 (1983—), 男, 博士, 上海韦尔半导体有限公司副总裁、高级工程师; 主要研究方向为 MEMS 器件、惯性传感器及麦克风;



蔡春华 (1985—), 男, 博士, 上海韦尔半导体有限公司项目经理, 华东师范大学通信与电子工程学院副研究员; 主要研究方向为 MEMS 传感器及其信号采集与电路设计;



秦明 (1967—), 男, 博士, 东南大学电子科学与工程学院教授、博士生导师; 目前主要研究方向为 MEMS 传感器、工艺和封装及智能微系统等;



张志强 (1983—), 男, 博士, 东南大学电子科学与工程学院、微电子学院副教授, 研究生导师; 目前主要研究方向为 RF MEMS 器件、MEMS 传感器及检测电路等。zqzhang@seu.edu.cn。