

C波段横向激励薄膜体声波谐振器设计与制备

吴高米^{1,2,3}, 马晋毅^{2,3}, 李尚志^{1,2,3}, 司美菊^{2,3}, 唐小龙^{2,3},
蒋世义^{2,3}, 江洪敏^{2,3}, 张祖伟^{2,3}

(1. 中国电子科技集团公司第二十四研究所, 模拟集成电路国家级重点实验室, 重庆 401332;

2. 中电科芯片技术(集团)有限公司, 重庆 401332; 3. 国知创芯(重庆)科技有限公司, 重庆 401332)

摘要:针对未来移动通信对射频前端器件提出的多频率、高集成新要求, 开展了兼具声表面波(SAW)谐振器和薄膜体声波谐振器(FBAR)技术特点的新型横向激励兰姆波谐振器研究。该文介绍了基于 c 轴择优取向氮化铝(AIN)压电薄膜的C波段横向激励薄膜体声波谐振器(XBAR)的结构设计、参数优化和制备方法, 并进行了工艺验证。通过剥离和刻蚀等步骤制备了谐振频率4.464 GHz、品质因数3 039、品质因数与频率之积($f \times Q$)达到 1.56×10^{13} GHz、面积小于 0.12 mm^2 的低杂波XBAR谐振器, 并仿真分析了其用于射频滤波器的可行性。该研究为进一步研制多频率、高集成的小型化XBAR滤波器组件提供了有效的设计技术和工艺技术支持。

关键词:压电微机电系统(MEMS)器件; C波段射频滤波器; 横向激励薄膜体声波谐振器(XBAR); 多频率; 高集成

中图分类号: TN384; TN65; TN713 文献标识码: A

Design and Fabrication of C-Band Laterally Excited Bulk Acoustic Resonator

WU Gaomi^{1,2,3}, MA Jinyi^{2,3}, LI Shangzhi^{1,2,3}, SI Meiju^{2,3}, TANG Xiaolong^{2,3},
JIANG Shiye^{2,3}, JIANG Hongmin^{2,3}, ZHANG Zuwei^{2,3}

(1. Science and Technology on Analog Integrated Circuit Laboratory, The 24th Institute of CETC, Chongqing 401332, China;

2. CETC Chips Technology Group Co., Ltd, Chongqing 401332, China;

3. NIICAS (Chongqing) Technology Co., Ltd, Chongqing 401332, China)

Abstract: Considering the new requirements for multiple frequencies and high integration in RF front-end devices for future mobile communication, this study examines a novel laterally excited Lamb wave resonator that exhibits both SAW and FBAR technical characteristics. The structure design, parameter optimization, and preparation method for a C-band laterally excited bulk acoustic resonator (XBAR) based on a c -axis optimally oriented aluminum nitride piezoelectric film are proposed, and the process is validated. Two XBAR samples with spurious mitigation were fabricated using lift-off and ICP-RIE, achieving a resonant frequency of 4.464 GHz, a quality factor of 3 039, and an $f \times Q$ product of 1.56×10^{13} GHz in a footprint smaller than 0.12 mm^2 . The application potential of the prepared resonators in an RF filter was simulated and analyzed. This study provides an effective design and process technology support for the further development of multi-frequency and highly integrated miniaturized filter modules.

Key words: piezoelectric micro-electro-mechanical systems device; C-band radio-frequency filter; laterally excited bulk acoustic resonator; multi-frequency; high-integration

0 引言

谐振器作为滤波器的核心器件, 对滤波器的性能起着决定作用。应用于射频滤波器的声表面波(SAW)谐振器和体声波(BAW)谐振器是目前无线

通信领域应用最广泛且技术最完备的压电微机电系统(MEMS)声学器件。随着未来5G-A和6G移动通信的兴起, 移动通信设备的多功能化成为发展的必然趋势, 这对射频前端器件提出了高频化、微

收稿日期: 2024-03-31

基金项目: 重庆市博士后科学基金资助项目(CSTB2023NSCQ-BHX0030)

作者简介: 吴高米(1994-), 男, 陕西省旬阳县人, 工程师, 博士。

型化、集成化和低成本的新要求,而 SAW&BAW 谐振器在此类应用方面存在局限^[1-2]。如 SAW 器件体积较大,且无法与集成电路工艺兼容,难以满足微型化和集成化的发展要求;BAW 器件虽然可实现较高的集成度,但对压电薄膜性能要求高,且制备工艺复杂,同时由于谐振频率取决于压电薄膜的厚度,所以难以在同一晶圆上通过单次加工制备出多种不同频率的器件。

基于兰姆波的横向激励薄膜体声波谐振器(XBAR)是一种新兴的压电微机械声学谐振器,主要由叉指换能器(IDT)和压电薄膜构成。通过 IDT 激发多模式、低色散、高声速的兰姆波在压电薄膜中传播和反射,最后形成驻波并在特定频率发生谐振。其谐振频率取决于电极周期,可在同一掩模板内设计多种频率的谐振器,并采用与 SAW 谐振器类似的叉指电极来实现兰姆波的电激励。同时可基于现有成熟的薄膜体声波谐振器(FBAR)工艺平台实现 XBAR 器件的制备。因此,XBAR 谐振器兼具 SAW 谐振器和 BAW 谐振器的特点^[1],是目前唯一可在单片晶圆上实现多频率、高品质因数(Q)和小尺寸的声学谐振器技术,能够满足未来移动通信设备多频率、集成化的发展需求,具有颠覆性的意义。

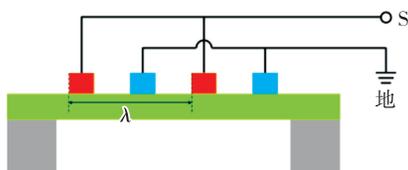
本文介绍了一种基于 c 轴择优取向氮化铝(AIN)压电薄膜的 C 波段 A_1 模式兰姆波 XBAR 谐振器的结构设计、参数优化和制备方法,并进行了工艺验证。

1 C 波段 AIN-XBAR 谐振器设计

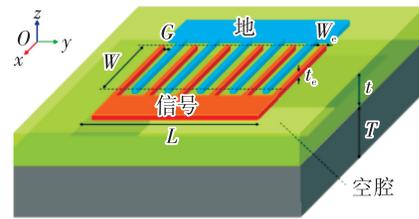
1.1 结构与优化

1.1.1 工作原理与基本结构

图 1 为背面空腔型 AIN-XBAR 谐振器结构示意图。由图可见,AIN 压电薄膜悬浮于空腔之上,利用叉指换能器(IDT)横向激发的各种模式兰姆波在压电薄膜中传播、反射,并在特定频率处发生谐振。根据声波传播时质点振动方向的不同,兰姆波可分为对称型兰姆波和反对称型兰姆波,对于 n 阶兰姆波分别记为 S_n 和 A_n 。



(a) 二维结构示意图



(b) 三维结构示意图

图 1 AIN-XBAR 谐振器结构示意图

图 2 为 AIN-XBAR 谐振器的典型导纳响应图。由图可见,在压电薄膜中存在各种模式的兰姆波,除谐振器工作采用声波模式(如 A_1 模式,称为主模)外,其他杂散模式(如 A_0 、 S_0 和 A_1 的高次谐波 A_{1-3} 、 A_{1-5} 等称为杂模)的存在会降低谐振器的品质因数和机电耦合系数,进而劣化滤波器的性能。

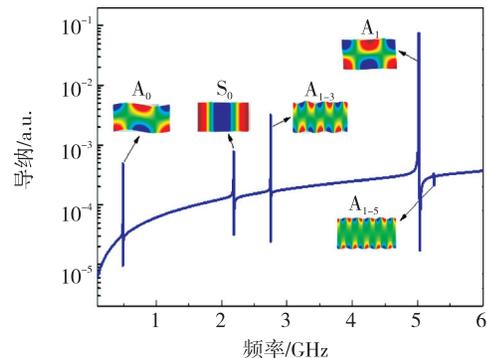
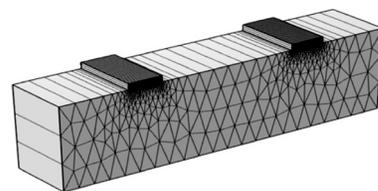


图 2 AIN-XBAR 谐振器典型导纳响应

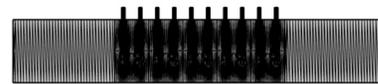
不同模式兰姆波的谐振频率和机电耦合系数与器件结构尺寸有关。通过优化压电层厚度(t)、电极层厚度(t_e)、电极周期(即波长 λ)、指条间距(G)和指条宽度(W_e)等结构参数,可实现对杂散模式的抑制^[3-5]。

1.1.2 仿真模型与参数优化

图 3 为建立的 XBAR 谐振器三维周期单元模型和沿声波传播方向(即图 1(b)中的 y 方向)的二维纵向切片模型。前者用于特定频率的谐振器结构设计,能抑制其杂散模式;后者用于叉指电极对数 N 的设计与优化。



(a) 三维周期单元模型



(b) 二维纵向切片模型

图 3 XBAR 谐振器有限元仿真模型

采用三维周期单元模型仿真比较了压电层膜厚 t 、波长 λ 和金属化比 r (r 指宽度与半波长之比, 即 $r=2W_e/\lambda$) 对谐振频率 (f_s, f_p) 和机电耦合系数 (K^2) 的影响规律, 结果如图 4 所示。

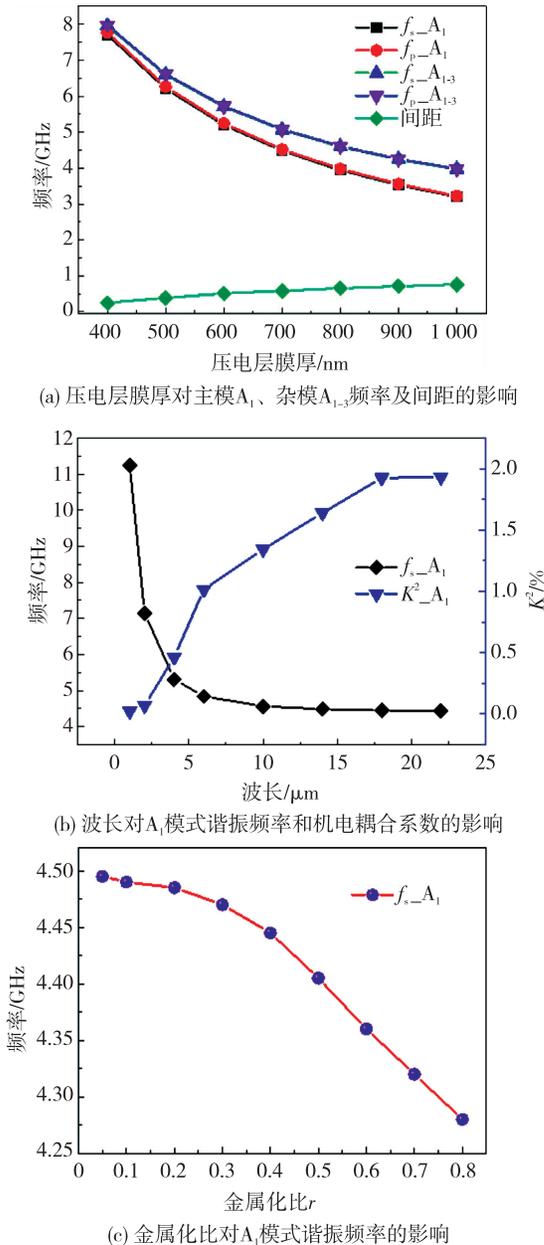


图 4 结构参数对 XBAR 谐振器性能的影响规律

由图 4 可得到以下结论:

1) 随着压电层膜厚的增大, A_1 模式及其三次谐波 A_{1-3} 模式的谐振频率逐渐减小, 且二者谐振频率的间距增大, 故适当增加压电层膜厚可使 A_{1-3} 杂模远离 A_1 主模。

2) 随着波长的增大, A_1 模式的谐振频率迅速减小, 但机电耦合系数不断增大, 故适当减小波长

可在保持较大机电耦合系数的同时提高谐振频率。

3) 当波长一定时, 金属化比增大, A_1 模式的谐振频率在小范围内降低, 故适当减小指条宽度可以增大谐振频率。

图 5 为基于周期单元模型仿真得到的不同电极厚度的 AlN-XBAR 谐振器的导纳响应。为避免曲线重合导致难以清楚地比较其异同, 对各导纳曲线的幅度进行了平移。由图可见, 当电极金属层较薄时, 其质量加载效应引起杂散模式的种类较少, 对应的幅度也相对较小。但电极太薄会增大接触电阻, 进而劣化器件损耗, 故在电极厚度设计时还需要综合考虑工艺水平。

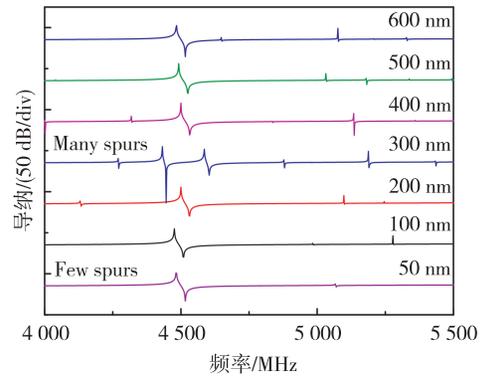


图 5 电极厚度对 AlN-XBAR 谐振器的影响

采用二维纵向切片模型比较不同指条数量对声波能量的束缚效果, 如图 6 所示。插图为 A_1 模式兰姆波振动位移。由图可见, 当指条数量较少时, 大部分 A_1 模式声波能量泄漏到有源区外, 导纳响应中杂模的幅度较大; 随着指条对数的增多, 主模振动更集中于有源区内, 泄漏到有源区外的能量大幅减少, 杂模幅度明显减小, 导纳曲线也趋于平滑。需要说明的是, 指条对数过多会导致谐振器尺寸增大, 尤其是电极周期较大的谐振器, 故设计指条数量时需考虑谐振器的电学性能和器件大小。

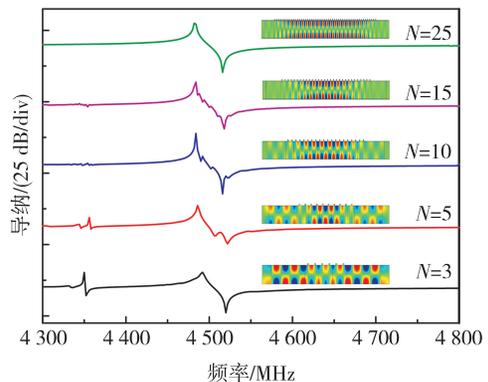


图 6 指条对数对 AlN-XBAR 谐振器的影响

1.1.3 C波段 A₁ 模式 AlN-XBAR 设计方案

基于上述结构参数对 XBAR 谐振器性能的影响规律和优化方法,本文设计了两款 C 波段 A₁ 模式 AlN-XBAR 谐振器,其导纳响应如图 7 所示,对应结构参数设计值如表 1 所示。

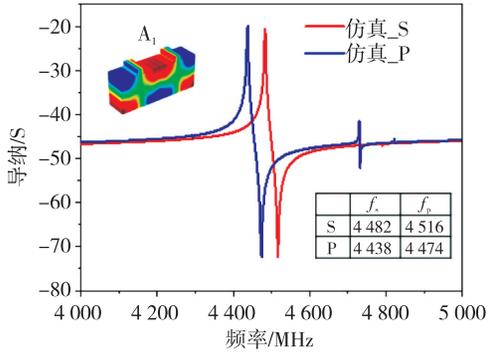


图 7 AlN-XBAR 谐振器导纳仿真曲线

表 1 谐振器结构参数设计值

参数	谐振器 S	谐振器 P
AlN 厚度 t /nm	700	
Al 电极厚度 t_e /nm	50	
指条数量 N /对	25	
金属化比 r	0.2	
电极周期 λ /μm	14	20
指条宽度 W_e /μm	1.4	2.0

1.2 工艺流程设计

为了实现 XBAR 谐振器的工艺验证,采用磁控溅射工艺在 6 英寸高阻硅晶圆上生长 AlN 压电薄膜。利用电子束蒸发技术制备电极层金属薄膜,并通过剥离工艺实现图形转移。基于 ICP-RIE 干法刻蚀工艺制备背面空腔,具体工艺流程如图 8 所示。

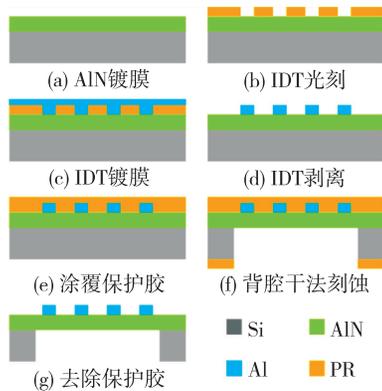


图 8 AlN-XBAR 谐振器制备工艺流程图

2 结果与讨论

为表征制备的 AlN 压电薄膜的择优取向度,采用 X 线衍射(XRD)技术测试其 XRD 摇摆曲线,如图

9 所示。由图可见,半高宽(FWHM)为 1.426°,表明制备的 AlN 压电薄膜的取向度优良。

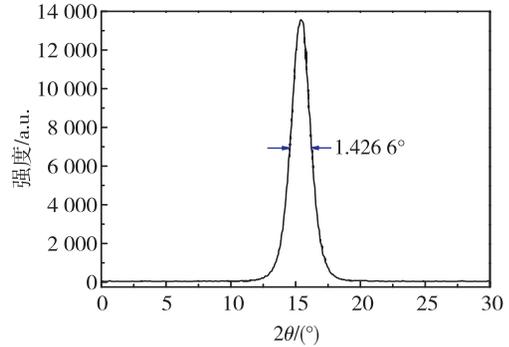
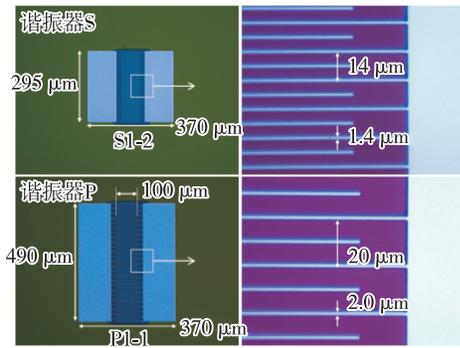
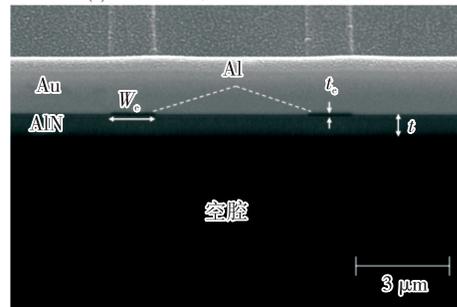


图 9 AlN 压电薄膜 XRD 摇摆曲线

图 10 为制备的 XBAR 谐振器光学显微镜照片和 FIB 切片的扫描电子显微镜(SEM)照片。由图可见,谐振器的叉指电极剥离效果良好,指条均匀、边界清晰,且背面空腔释放干净,未见明显衬底硅残留。两款谐振器的尺寸分别小于 0.3 mm×0.4 mm 和 0.5 mm×0.4 mm。



(a) 光学显微镜照片与指条放大图



(b) 扫描电子显微镜照片

图 10 制备的 XBAR 谐振器显微照片

基于探针设备和矢量网络分析仪测试得到两款 AlN-XBAR 谐振器的导纳响应如图 11 所示。由图可见,谐振器 S 在测试范围内无明显杂波,谐振频率 $f_s = 4.476$ GHz,品质因数 $Q_s = 2\,083$, $Q_p = 1\,074$,且 $f_s \times Q_s \approx 9.32 \times 10^{12}$ GHz;谐振器 P 仅在高频远端有一个小幅度杂波,谐振频率 $f_s = 4.464$ GHz,品

质因数 $Q_s = 3\ 039$, $Q_p = 1\ 000$, 且 $f_s \times Q_s \approx 1.56 \times 10^{13}$ GHz。两款谐振器的谐振频率与品质因数的乘积比多数文献报道的结果高近 1 个数量级^[1]。

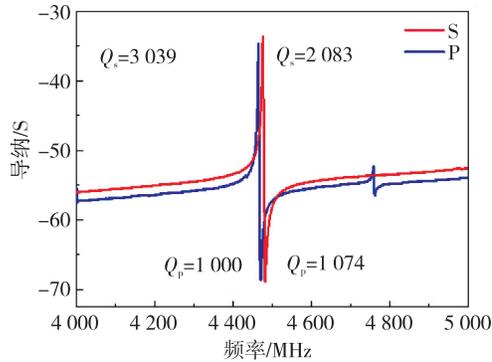


图 11 两款 AlN-XBAR 谐振器导纳测试曲线

需要说明的是, 谐振频率与设计频率之间存在微小偏差, 其原因是压电层薄膜的厚度存在轻微起伏, 可通过增加调频工艺进行修正。测试结果中导纳比和机电耦合系数略低于仿真结果, 其原因是仿真模型中暂未考虑材料的介电损耗、欧姆损耗和机械损耗的影响, 可通过参数提取和模型优化解决。

为进一步评估制备的 AlN-XBAR 谐振器应用于滤波器的潜力, 将谐振器测试数据导入 ADS 软件中, 并搭建了梯形拓扑结构的 XBAR 滤波器, 仿真得到滤波器的 S_{21} 特性曲线如图 12 所示。该 AlN-XBAR 滤波器的标称频率为 4.470 GHz, 顶部插损为 2.8 dB, -3 dB 带宽约 5 MHz, 带外抑制大于 34 dBc。插入损耗和通带波形可通过优化谐振器孔径大小得到进一步改善, 极窄的带宽使其可作为 C 波段点频滤波器使用。该 AlN-XBAR 滤波器表现出的优异性充分验证了 XBAR 谐振器应用于新型兰姆波滤波器的巨大潜力。

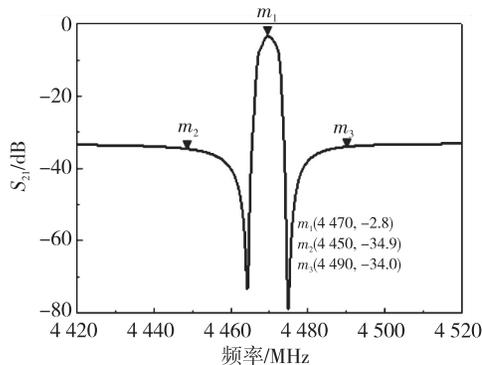


图 12 AlN-XBAR 滤波器 S_{21} 仿真曲线

3 结束语

本文介绍了基于 c 轴择优取向氮化铝压电薄膜的 C 波段横向激励薄膜体声波谐振器的结构设计、参数优化和制备方法。通过对各膜层和指条等结构的设计与参数优化实现了低杂波 XBAR 谐振器设计。通过磁控溅射工艺制备了高择优取向度氮化铝压电薄膜。通过电子束蒸发工艺制备了电极薄膜。采用剥离和刻蚀等工艺制备了谐振频率为 4.464 GHz、品质因数为 3 039、 $f \times Q$ 值达到 1.56×10^{13} GHz, 且面积小于 0.12 mm^2 的低杂波 XBAR 谐振器, 并仿真分析了其用于射频滤波器的可行性, 验证了设计方法和制备工艺的有效性。该 XBAR 谐振器具备的技术特点为满足未来移动通信对射频前端滤波器提出的多频率和高集成的新要求提供了具体思路和方法。

参考文献:

- [1] 于晓权, 何杰, 马晋毅. 压电 MEMS 兰姆波器件技术的最新进展与展望[J]. 压电与声光, 2022, 44(2): 223-229.
YU Xiaoquan, HE Jie, MA Jinyi. Recent advances and prospects of Lamb wave devices based on piezo-MEMS [J]. Piezoelectrics & Acousto-optics, 2022, 44(2): 223-229.
- [2] SHAO Shuai, LUO Zhifang, WU Tao. High figure-of-merit Lamb wave resonators based on $\text{Al}_{0.7}\text{Sc}_{0.3}\text{N}$ thin film[J]. IEEE Electron Device Letters, 2021, 42(9): 1378-1381.
- [3] YANG Yansong, LU Ruochen, GONG Songbin. High Q antisymmetric mode lithium niobate MEMS resonators with spurious mitigation[J]. Journal of Microelectromechanical Systems, 2020, 29(2): 135-143.
- [4] PLESSKY V, YANDRAPALLI S, TURNER P J, et al. 5 GHz laterally-excited bulk-wave resonators (XBARs) based on thin platelets of lithium niobate [J]. Electronics Letters, 2019, 55(2): 98-100.
- [5] PLESSKY V. XBAR (invited) [C] // [S. I.]: 2022 IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS), 2022.