氮化铝Lamb波谐振器的能量损耗分析研究

赵继聪[1,2],吕世涛[1,2],张敖宇[1,2],宋晨光[3],孙海燕[1,2]
(1. 南通大学江苏省专用集成电路设计重点实验室,江苏南通 226019; 2. 南通大学信息科学技术学院,江苏南通 226019;
3. 南通大学电气工程学院,江苏南通 226019)

摘 要: 本文介绍了工作频率为400 MHz和2 GHz氮化铝Lamb波谐振器的结构设计、微纳制造及测试表征,研究了锚点损耗和声子间相互作用损耗对Lamb波谐振器品质因数(Q值)的影响,并分析了不同工作频率的Lamb波谐振器的主要能量损耗来源. 研究发现:对于低频谐振器,锚点损耗为其主要能量损耗来源,因此减小支撑轴宽度可减少通过支撑轴泄漏至衬底的能量,进而提高Q值;对于高频谐振器,声子间相互作用损耗为其主要能量损耗来源,因此相比于金(Au),采用铝(Al)作为叉指电极(IDT)材料的谐振器具有更高Q值. 针对Lamb波谐振器的结构特点,设计了一套基于七步光刻工艺的微纳制程,成功制备了具有微型化释放腔体的Lamb波谐振器,并具备优异的性能. 测试结果表明,工作频率为400 MHz和2 GHz的Al-IDT谐振器的串联品质因数(Q_s)分别达到2 590和1 192.

关键词: 微机电系统;Lamb波谐振器;品质因数;能量损耗;制备工艺
基金项目: 国家自然科学基金(No.62174092,No.61804084)
中图分类号: TN4;TN712 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112(2023)01-0222-09
电子学报URL:http://www.ejournal.org.cn **DOI:**10.12263/DZXB.20220897

Analysis and Research on Energy Loss of Aluminum Nitride Lamb Wave Resonators

ZHAO Ji-cong[1,2],LÜ Shi-tao[1,2],ZHANG Ao-yu[1,2],SONG Chen-guang[3],SUN Hai-yan[1,2]
(1. *Jiangsu Key Laboratory of ASIC Design, Nantong University, Nantong, Jiangsu* 226019, *China*;
2. *School of Information Science and Technology, Nantong University, Nantong, Jiangsu* 226019, *China*;
3. *School of Electrical Engineering, Nantong University, Nantong, Jiangsu* 226019, *China*)

Abstract: In this paper, the structural design, micro-nano fabrication and test characterization of AlN Lamb wave resonators with operating frequencies of 400 MHz and 2 GHz were studied. The effects of anchor loss and interaction loss between phonons on the quality factor (Q value) of Lamb wave resonators were analyzed, and the main energy loss sources of Lamb wave resonators at different operating frequencies were clarified. The results show that for low-frequency resonators, the anchor loss is the main source of energy loss, so reducing the width of the support shaft can reduce the energy leaking to the substrate through the support shaft, thereby increasing the Q value. For high-frequency resonators, the loss of interaction between phonons is the main source of energy loss, so the resonator using aluminum (Al) as the interdigital electrode (IDT) material has a higher Q value than gold (Au). According to the structural characteristics of the designed Lamb wave resonators, a fabrication technology based on seven-step lithography process was designed, and the Lamb wave resonators with miniaturized release cavities were successfully fabricated with excellent performance. The test results show that the series quality factors (Q_s) of Al-IDT resonators operating at 400 MHz and 2 GHz reach 2 590 and 1 192, respectively.

Key words: MEMS; Lamb wave resonator; quality factor; energy loss; manufacturing process
Foundation Item(s): National Natural Science Foundation of China (No.62174092, No.61804084)

1 引言

受益于微机电系统(MEMS)技术的发展和微纳加工技术的进步,具备小尺寸、低功耗以及优异性能的MEMS声学谐振器迅速崛起,在滤波器、混频器、振荡器及传感器等领域得以广泛应用[1,2]. 其中,以表面声波(SAW)谐振器和薄膜体声波谐振器(FBAR)为代表的声学谐振器技术凭借着成本或性能等方面的优势,率先实现商业化应用. SAW谐振器的工艺较为简单,制造

收稿日期:2022-07-26;修回日期:2022-10-07;责任编辑:孙瑶

成本较低,可以实现单芯片上多频段的集成[3];FBAR的功率容度和品质因数Q高,在高频应用中具有明显优势[4]. 然而,这两种谐振器技术依然存在各自的缺陷:SAW谐振器的Q值和功率容度较低,且受光刻工艺限制及低声速工作模式的影响,其工作频率难以超过3 GHz;FBAR的工作频率由压电薄膜厚度所决定,因而很难实现片上多频段集成. 氮化铝Lamb波谐振器因同时具备SAW谐振器的片上多频段集成和FBAR的高频、高功率容度的优势,成为未来射频前端的发展趋势. 虽然Lamb波谐振器在未来射频前端中极具应用前景,但目前仍处于基础研发阶段,其关键性能尚有提升空间.

近年来,国内外众多研究机构将研究重点放在提升Lamb波谐振器的Q值上. Q值是谐振器能量损耗的量度:在射频滤波器的应用中,提升谐振器的Q值有利于降低滤波器的插入损耗;在振荡器的应用中,提升谐振器的Q值有利于降低振荡器的抖动和相位噪声;在传感器的应用中,提升谐振器的Q值有利于提高传感器的分辨率[5,6]. 在Lamb波谐振器的每个振动周期内,都会发生机械能与电能的相互转化,在该过程中任何形式的固有损耗或外在损耗都会造成谐振器Q值的衰减. 固有损耗由谐振器的尺寸和材料决定,该损耗以声子间相互作用(inter-phonon)损耗为主要损耗来源,决定了Lamb波谐振器Q值的上限. 外在损耗取决于器件的结构设计,对于使用相同工艺制备且主体器件结构相同的谐振器,锚点损耗为外在损耗的主要来源之一[7]. 在前期研究中,已有的降低Lamb波谐振器能量损耗的方法主要有:采用声子晶体(PnC)结构来降低支撑轴处的振动和声学泄漏[8];设计平面声学反射边界将声波限制在压电振动区域[9];采用悬凸自由反射边界将振动集中于器件中心区域来降低锚点损耗[10];采用氮化铝和单晶硅的复合薄膜替换传统的氮化铝压电层以降低谐振器的固有损耗,进而减小动态阻抗[11]. 然而,这些方法在提高Lamb波谐振器Q值的同时,往往会牺牲谐振器的其他性能:采用PnC结构可能会造成Lamb波谐振器的可靠性降低;采用平面声学反射边界及悬凸自由反射边界可能会造成反射声波的幅值和相位发生偏移,进而引入杂散信号;而采用氮化铝和单晶硅的复合薄膜结构在降低动态阻抗的同时会牺牲器件的压电转换性能,从而造成谐振器有效机电耦合系数k_{eff}^2的降低.

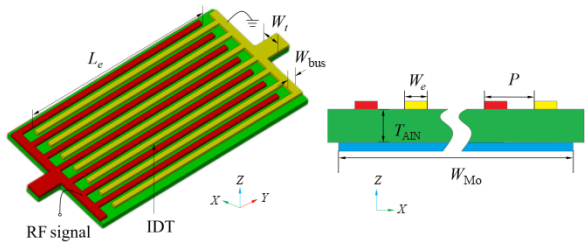
此外,Lamb波谐振器的外在损耗也受实际微纳制造的影响,采用先进可靠的微纳制造工艺可在提高谐振器Q值的同时,保障谐振器的高成品率制备. 目前,氮化铝Lamb波谐振器的微纳制造工艺主要有两种,区别主要在于是否设置释放阻挡层结构:采用无释放阻挡层结构的谐振器制造工艺较为简单,但在谐振器底部空腔的制造过程中,释放时间难以控制,易造成非有源区域的衬底被释放气体刻蚀,进而影响谐振器Q值及可靠性等[12];另一种方法是在牺牲层中刻蚀形成环形槽,再采用低压化学气相沉积(LPCVD)工艺在环形槽中沉积多晶硅(Poly-Si)或氧化硅(SiO_2)作为释放阻挡层结构,然而,采用LPCVD沉积的多晶硅或氧化硅往往致密性较差,部分释放气体渗透通过释放阻挡层,进而造成谐振器失效[13].

由此,本文设计了工作频率分别为400 MHz和2 GHz的氮化铝Lamb波谐振器,通过理论分析、有限元仿真和加工测试等方法研究了固有损耗和外在损耗对谐振器Q值的影响,并分析了不同工作频率谐振器的主要损耗来源. 本文还提供了一种适用于氮化铝Lamb波谐振器的先进微纳制造工艺,通过精确定义小型化的释放腔来进一步降低外在损耗,进而提高谐振器Q值. 实验结果表明,通过降低谐振器的外在损耗和固有损耗,工作频率为400 MHz和2 GHz的Lamb波谐振器的Q值分别高达2 590和1 192.

2　谐振器的设计及原理分析

本文所设计的氮化铝Lamb波谐振器的结构如图1(a)所示,器件主体由电极-压电层-电极复合形成的压电振动结构. 图1(b)展示了Lamb波谐振器的切面图:顶部为交替接入正负电位、厚度为200 nm的叉指电极(IDT)结构;中间是厚度(T_{AlN})为1 μm的氮化铝(AlN)压电层;底部为厚度200 nm的平板电极. 在输入射频信号的作用下,电极间产生电势差,引起压电薄膜的应变,完成由电能向机械能的转换. 当输入信号的频率与压电振动结构的机械振动频率相同时,引起谐振器的强共振,再通过正压电效应实现机械能向电能的转换,进而输出有特定工作频率的电学信号. 输出信号频率主要由谐振器IDT电极周期所决定,由此本文分别设计了IDT周期(P)为12 μm和2 μm的Lamb波谐振器,以分析不同工作频段谐振器的能量损耗机制. 机械能和电能相互转换过程中的能量耗散直接影响谐振器的Q值,根据损耗机制的不同,谐振器的能量耗散来源被分为外在损耗和固有损耗. 外在损耗主要包括锚点损耗、空气阻尼损耗、欧姆损耗和介面损耗等,分别对应Q_{anchor},Q_{air},Q_{ohmic}和$Q_{\mathrm{interface}}$;固有损耗主要包括介电损耗、压电损耗、声子间相互作用损耗等,分别对应$Q_{\mathrm{dielectric}}$,$Q_{\mathrm{piezoelectric}}$和$Q_{\mathrm{inter\text{-}phonon}}$. 根据外在损耗和固有损耗的成因,可建立如式(1)所示的Lamb波谐振器的能量损耗模型:

$$\frac{1}{Q_{\mathrm{loss}}}=\frac{1}{Q_{\mathrm{anchor}}}+\frac{1}{Q_{\mathrm{air}}}+\frac{1}{Q_{\mathrm{ohmic}}}+\frac{1}{Q_{\mathrm{interface}}}+\frac{1}{Q_{\mathrm{dielectric}}}+\frac{1}{Q_{\mathrm{piezoelectric}}}+\frac{1}{Q_{\mathrm{inter\text{-}phonon}}} \tag{1}$$



(a) 结构图 (b) 切面图

图1 氮化铝Lamb波谐振器的结构图和切面图

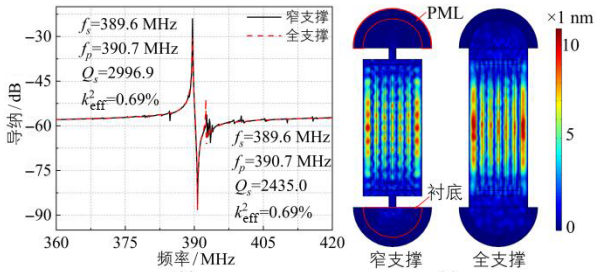
其中，锚点损耗表示谐振器主体区域通过支撑轴泄漏至衬底的能量损耗，其值与支撑轴及工作频段等相关，是影响Lamb波谐振器Q值的主要损耗来源之一；空气阻尼损耗取决于谐振器的振动频率，对基频较高的谐振器影响较小；欧姆损耗与金属电极的电阻相关，选用电阻率较低的金属电极并增加电极厚度可有效降低该损耗对谐振器Q值的影响，对Lamb波谐振器Q值的影响较小；介面损耗与压电层和电极的接触面积相关，该损耗对具备相同电极周期、数量及占空比的谐振器影响几乎相同；介电损耗和压电损耗与谐振器的压电材料相关，对压电谐振器Q值的影响较小；声子间相互作用损耗表示谐振器振动时，其能量可以量化为声子，声子由平衡状态到非平衡状态再到另一个平衡状态的过程中，弹性声子和非弹性声子相互扰动，会造成不可逆的能量损耗，是影响Lamb波谐振器Q值的另一个主要损耗来源．因此，本文重点研究锚点损耗和声子间相互作用损耗对Lamb波谐振器Q值的影响．本工作针对两种电极周期的Lamb波谐振器各设计了两种不同的支撑轴宽度(W_t)，并研究影响声子间相互作用损耗的主要因素，从而提升谐振器的Q值．表1列举了Lamb波谐振器的其他关键几何参数：电极周期(P)、叉指电极的有效长度(L_e)、Bus区宽度(W_{bus})、叉指电极宽度(W_e)、底部钼(Mo)电极宽度(W_{Mo})和支撑轴宽度(W_t)．

为了研究该损耗对谐振器性能的影响，本工作通过Comsol Multiphysics V5.5a有限元软件模拟分析了Lamb波谐振器的频谱响应及振动模态．图2(a)展示了电极周期为12 μm，支撑轴宽度分别为12 μm(窄支撑结构)和96 μm(全支撑结构)的Lamb波谐振器的导纳图，根据式(2)和式(3)可分别计算出Lamb波谐振器的串联谐振品质因数(Q_s值)和k_{eff}^2[14]，即

$$Q_s=\frac{f_s}{\Delta f_{3dB}} \tag{2}$$

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

其中，f_s和f_p分别表示Lamb波谐振器的串联和并联谐振频率．支撑结构对谐振器频率和k_{eff}^2的影响较小，在目标模态处，采用窄支撑结构和全支撑结构谐振器的串、并联谐振频率和k_{eff}^2相同，其值分别为389.6 MHz、390.7 MHz和0.69%．两者的Q_s值分别为2 996.9和2 435.0，与采用窄支撑结构的Lamb波谐振器相比，采用全支撑结构的谐振器Q_s值有所衰减，这是因为通过减小支撑轴的宽度可形成空气反射边界，有助于将能量集中在压电振动结构中．如图2(b)所示，通过在衬底外侧设置完美匹配层(PML)，用于快速吸收声波，使反射声波几乎为0，此时衬底中的能量均来自与之相连的支撑轴．对于采用全支撑结构的谐振器，较多能量通过支撑轴泄漏至衬底，而当支撑轴宽度减小时，泄漏至衬底的能量显著减少，从而获得更高的Q_s值．



(a) 导纳图 (b) 振动位移图

图2 电极周期为12 μm的Lamb波谐振器的导纳图和振动位移图

表1 氮化铝Lamb波谐振器的关键几何参数 单位：μm

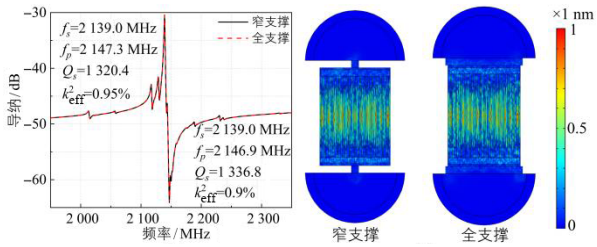
	P	W_t	W_e	W_{bus}	W_{Mo}	L_e
Design A	12	96	8.5	7	72	192
Design B	12	12	8.5	7	72	192
Design C	2	72	1	6	68	60
Design D	2	7	1	6	68	60

图3(a)展示了电极周期为2 μm，支撑轴宽度分别为7 μm(窄支撑)和72 μm(全支撑)的Lamb波谐振器的导纳图．采用全支撑和窄支撑结构的Lamb波谐振器的串联谐振频率值均为2 139.0 MHz，远高于电极周期为12 μm的谐振器，这是因为Lamb波谐振器的工作频率主要由IDT的周期决定[15]，如式(4)所示：

$$f_s=\frac{v}{\lambda} \tag{4}$$

其中，波长$\lambda=2\times P$．v表示Lamb波的相速度，其值主要受材料影响，而不同IDT周期Lamb波谐振器的表面金属占比不同，因此Lamb波在不同IDT周期谐振器中传播的相速度略有差异[16]．此外，质量负载效应同样对Lamb波谐振器的工作频率有一定的影响，不同IDT周期Lamb波谐振器的表面金属覆盖面积不同，其工作频率受质量负载效应的影响程度也不同．与低频谐振器相同，支撑轴宽度对高频谐振器的k_{eff}^2影响同样较小，其值分别为0.9%和0.95%．与低频谐振器的仿真结果不同的是，采用全支撑结构的Lamb波谐振器的Q值与

采用窄支撑结构的Lamb波谐振器相近,其Q_s分别为1 336.8和1 320.4. 这是因为当谐振频率较高时,位移集中在压电振动结构的中心区域,通过支撑轴泄漏至衬底的能量很少,如图3(*b*)所示.



(*a*) 导纳图　　(*b*) 振动位移图

图3　电极周期为2 μm的Lamb波谐振器的导纳图和振动位移图

对比上述两种电极周期的Lamb波谐振器,可以发现锚点损耗对低频谐振器的Q值影响较大,而对高频谐振器的Q值影响较小. 这是因为Q_{anchor}与谐振器主体区域能量$E_{resonator}$和支撑轴区域能量E_{tether}的比值相关[17],如式(5)所示:

$$Q_{anchor} \propto \frac{E_{resonator}}{E_{tether}} \tag{5}$$

其中,$E_{resonator}$和E_{tether}由该区域的刚度k_i和振幅A_i来表示[18],如式(6)所示:

$$E_i = \frac{1}{2} k_i A_i^{\,2} \tag{6}$$

其中,k_i的值与器件的材料和横截面面积有关,而本文中全支撑结构的支撑轴材料与横截面面积均与谐振器的主体区域相同. 因此采用全支撑结构的谐振器Q_{anchor}值仅与谐振器主体区域的振幅$A_{resonator}$和支撑轴区域的振幅A_{tether}有关,如式(7)所示:

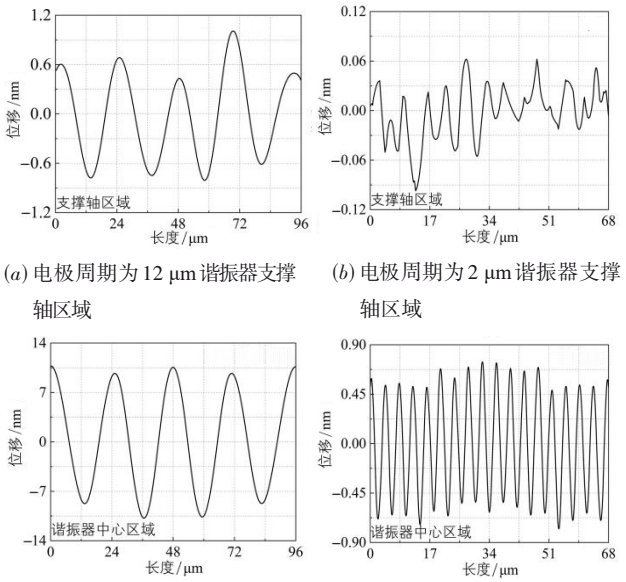
$$Q_{anchor} \propto \left(\frac{A_{resonator}}{A_{tether}}\right)^2 \tag{7}$$

图4分别展示了电极周期为12 μm和2 μm的Lamb波谐振器沿器件宽度(X轴)方向的振动位移曲线,其中图4(*a*)和图4(*b*)为支撑轴区域的振动位移曲线,图4(*c*)和图4(*d*)为谐振器主体区域的振动位移图. 结果表明,后者的Q_{anchor}值为前者的1.45倍,因此锚点损耗对低频谐振器Q值影响大于高频谐振器.

声子间相互作用损耗为本文研究的固有损耗的主要来源,该损耗分为散射损耗和扩散损耗,如式(8)所示:

$$\frac{1}{Q_{inter\text{-}phonon}} = \frac{1}{Q_{AKE}} + \frac{1}{Q_{TED}} \tag{8}$$

散射损耗表示在谐振器发生共振时,压电振动结构发生形变,弹性声子和热声子相互扰动,造成热失衡,在恢复平衡的过程中,会引起不可逆的弹性能量损耗. 这种散射机制引起的损耗被称为Akheiser损耗,该



(*a*) 电极周期为12 μm谐振器支撑轴区域　　(*b*) 电极周期为2 μm谐振器支撑轴区域

(*c*) 电极周期为12 μm谐振器主体区域　　(*d*) 电极周期为2 μm谐振器主体区域

图4　Lamb波谐振器沿X轴方向的振动位移曲线

损耗与谐振器Q值的关系[19]可以由式(9)表示:

$$Q_{AKE} = \frac{\rho c^4}{2\pi f \gamma_{avg}^2 kT} \tag{9}$$

其中,ρ表示压电材料的密度;c表示Lamb波的声速;f表示谐振频率;γ_{avg}是一个无量纲的热学参数;k表示热导率;T表示器件温度. 因此,当器件结构和压电材料均相同时,电极的热导率是影响谐振器Akheiser损耗的主要因素. 另外,该损耗与谐振器的工作频率正相关,换而言之,谐振频率越高,每个振动周期内可供谐振器恢复热平衡的时间越短,Akheiser损耗对谐振器Q值的影响越大.

扩散损耗表示因谐振器的非均匀形变而造成热量的不均匀分布,声子会自发的由高温区域向低温区域转移,因而造成不可逆的热量耗散. 这种以热量扩散形式造成的损耗称为热弹性阻尼(TED)损耗,该损耗的大小取决于热传输时间和振动周期:当热传输时间与振动周期接近时,TED损耗最大;当热传输时间远大于或远小于振动周期时,TED损耗则因谐振器内部无法形成热流近乎可以忽略. 式(10)展示了谐振器的热动力学耦合方程[20,21],即

$$k\nabla^2 T - C_v \frac{\partial T}{\partial t} = \alpha\left(3\lambda + 2\mu\right) T_{ref}\left(\frac{\partial}{\partial x}\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial y}\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}\frac{\partial w}{\partial t}\right) \tag{10}$$

其中,C_v表示比热容;T_{ref}表示环境温度;λ和μ为Lamb波的固有参数;u,v,w为谐振器振动时对应x,y,z方向上的位移. 由此可得,由于金属电极与AlN的声阻抗不同,在AlN表面覆盖电极会引起Lamb波的传播方向发

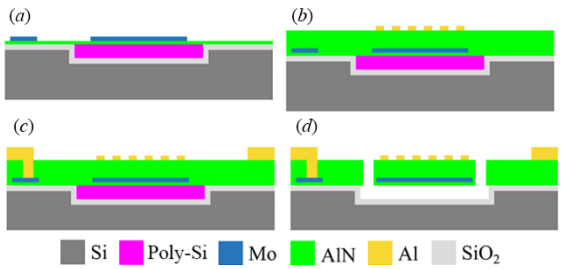
生偏移，因此被电极覆盖区域周围的温度高于其他区域，并且电极材料与AlN的声阻抗越接近，Lamb波在电极处的偏移越严重；金属电极的导热系数越高、比热容越小，则热传输时间越小，当其与振动周期接近时，会进一步加剧TED损耗．此外，高频谐振器的Q值与损耗的关系[22]可以近似地用式(11)来表示：

$$\frac{1}{Q}=2\frac{\mathrm{Im}(\omega_0)}{\mathrm{Re}(\omega_0)} \tag{11}$$

其中，ω_0表示在复合特征角频率，其实部和虚部分别表示谐振频率和能量耗散．因此，谐振频率越高，TED损耗对谐振器Q值的影响越大[23]．

3 微纳制备工艺

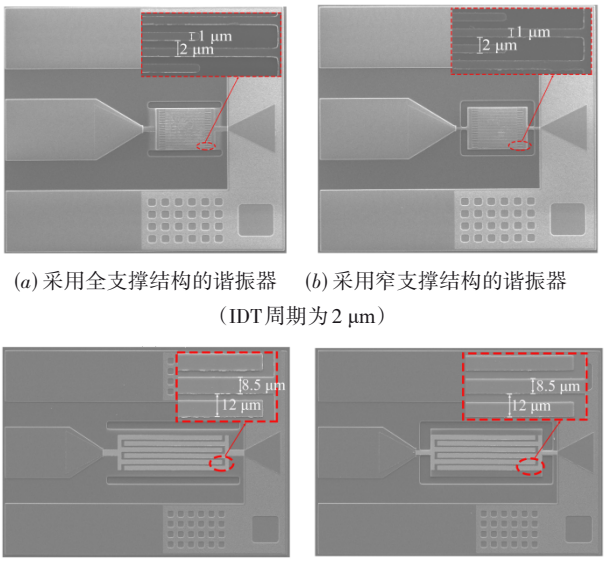
Lamb波谐振器的制造过程也会影响谐振器的外在损耗，本文基于6寸高阻硅(Si)晶圆设计了Lamb波谐振器的微纳制程工艺．第一步，如图5(*a*)所示，通过反应离子刻蚀工艺(RIE)，形成1 μm深的释放腔，并通过热氧化工艺形成SiO_2释放阻挡层，然后采用LPCVD在晶圆上沉积1.5 μm厚的Poly-Si，并刻蚀释放腔外的多晶硅，通过化学机械抛光工艺(CMP)使其平整化，再通过磁控溅射工艺(MS)先后沉积厚度为100 nm的AlN种子层和厚度为200 nm的Mo，并通过RIE工艺使底电极和底部Pad图案化．第二步，如图5(*b*)所示，通过MS工艺在晶圆上沉积1 μm厚的AlN薄膜，然后沉积200 nm厚的金属Al，并通过剥离工艺使其形成顶部IDT电极．第三步，如图5(*c*)所示，刻蚀底部Pad区域上方的AlN，然后沉积1 μm厚的金属Al，并图案化形成测试Pad．第四步，如图5(*d*)所示，刻蚀厚度为1.1 μm的AlN薄膜，用来定义器件形貌并形成释放孔，然后将晶圆置于二氟化氙(XeF_2)气体中释放，形成振动结构下方的空腔．



(*a*) 硅刻蚀和热氧化；多晶硅沉积和刻蚀；AlN种子层沉积和底电极图案化；(*b*) AlN沉积及IDT电极图案化；(*c*) 刻蚀Pad上的AlN，制备Al Pad；(*d*) 刻蚀AlN并释放

图5 氮化铝Lamb波谐振器的微纳制造工艺

图6展示了采用上述微纳工艺制备的氮化铝Lamb波谐振器的扫描电子显微镜(SEM)图．其中，图6(*a*)和图6(*b*)分别为制备的IDT周期为2 μm，采用全支撑和窄支撑结构的Lamb波谐振器；图6(*c*)和图6(*d*)分别为IDT周期为12 μm，采用全支撑和窄支撑结构的Lamb波谐振器．



(*a*) 采用全支撑结构的谐振器 (*b*) 采用窄支撑结构的谐振器

(IDT周期为2 μm)

(*c*) 采用全支撑结构的谐振器 (*d*) 采用窄支撑结构的谐振器

(IDT周期为12 μm)

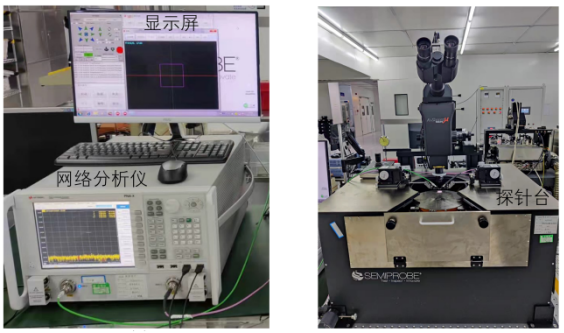
图6 氮化铝Lamb波谐振器的SEM图

4 测试与分析

为分析氮化铝Lamb波谐振器的性能，本文通过如图7(*a*)所示的Keysight NS5244 A矢量网络分析仪和图7(*b*)所示的Semiprobe SA8探针台对采用上述工艺制备的谐振器进行频响测试．矢量网络分析仪的信号功率为1 mW，在测试前对矢量网络分析仪和探针台进行了短路-负载-开路(SLO)校准，以降低测试误差．本文所设计的氮化铝Lamb波谐振器为单端口器件，其测试结果为S_{11}散射参数，通过式(12)可将其转换为Y_{11}导纳参数[24]，即

$$Y_{11}\,(\mathrm{dB})=20\lg|Y_{11}|=20\lg\left|\frac{1}{Z_0}\frac{1-S_{11}}{1+S_{11}}\right| \tag{12}$$

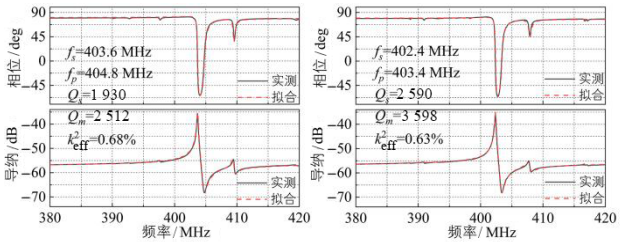
其中，Z_0的值为50 Ω，代表网络分析仪的源或负载的特性阻抗．



(*a*) Keysight NS5244 A矢量网络分析仪 (*b*) Semiprobe SA8探针台

图7 Lamb波谐振器测试设备图

电极周期为12 μm的Lamb波谐振器的测试结果如图8所示. 图8(*a*)和图8(*b*)分别为采用全支撑和窄支撑结构的Lamb波谐振器的Y_{11}导纳参数和相位图. 与仿真结果相同,支撑轴宽度对Lamb波谐振器的谐振频率和k_{eff}^2的影响较小,采用全支撑和窄支撑结构的Lamb波谐振器的f_s和k_{eff}^2分别为403.6 MHz和0.68%、402.4 MHz和0.63%. 当谐振器的工作频率较低时,增加支撑轴宽度会造成Lamb波谐振器的Q值降低,采用全支撑和窄支撑结构的Lamb波谐振器的Q_s值分别为1 930和2 590. 这是因为低频谐振器的能量较为分散,在Bus区和锚点区域存在较大的位移,增加支撑轴宽度会增加通过支撑轴泄漏至衬底的能量,进而造成锚点损耗增大,引起谐振器Q值的衰减. 此外,测试结果与仿真结果间存在一定差异,这是因为仿真材料中的耦合矩阵、弹性矩阵、相对介电常数等参数与实际材料参数间存在差异,并且工艺误差会引起实际加工的器件尺寸与预设尺寸间存在一定偏差.



(*a*) 全支撑结构Lamb波谐振器　　(*b*) 窄支撑结构Lamb波谐振器

图8　测试的IDT周期为12 μm的Lamb波谐振器的导纳和相位曲线图

为了研究Lamb波谐振器的电学特性,本文使用如图9所示的Modified Butterworth-van Dyke (MBVD)等效电路模型来提取上述Lamb波谐振器的关键电学参数[25]. 该模型由静态电容C_0、静态电阻R_0、动态电容C_m、动态电感L_m、动态电阻R_m以及串联电阻R_s等元件构成. 其中L_m与R_m的比值决定了谐振峰的陡峭程度,C_0与C_m的比值反映出了压电性能的强弱. R_s与R_0主要分别影响谐振器的串联谐振频率和并联谐振频率处的响应,而R_m则对两者都有影响,因此L_m与R_m+R_s及R_m+R_0的比值分别反应了串、并联谐振峰的陡峭程度. 值得注意的是,谐振器的欧姆损耗被包含在R_s中,介电损耗则被包含在R_0中,而声学泄漏造成的锚点损耗则是影响谐振器R_m值因素之一[26]. Lamb波谐振器的等效电学参数的提取方法已在前期工作中进行报道[6],基于该方法对Lamb波谐振器的实测导纳参数进行拟合,表2展示了从拟合结果中提取的等效电学参数. 本文研究的电极周期为12 μm的Lamb波谐振器仅支撑结构不同,因此谐振器的欧姆损耗和介电损耗几乎相同,其R_s值和R_0值分别为14.3 Ω和119.2 Ω、16.0 Ω和117.2 Ω. 然而,采用全支撑结构的Lamb波谐振器通过支撑轴泄漏至衬底的能量高于采用窄支撑结构的Lamb波谐振器,因此,前者的动态电阻R_m值高于后者,其值分别为47.4 Ω和41.1 Ω. 此外,为了去除电极阻抗对谐振器性能的影响,通过式(13)可计算谐振器的动态品质因数Q_m[27],即

$$Q_m=\left(\frac{R_m+R_s}{R_m}\right)Q_s \tag{13}$$

其中,Q_m值反映了Lamb波谐振器的机械损耗水平,采用全支撑和窄支撑结构的Lamb波谐振器的Q_m值分别达到2 512和3 598.

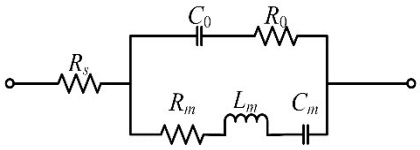
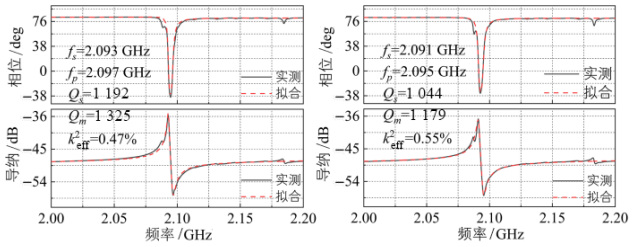


图9　Lamb波谐振器的MBVD等效电路模型

表2　Lamb波谐振器的等效电学参数

	Design A	Design B	Design C	Design D
R_s/Ω	14.3	16.0	7.18	8.49
R_0/Ω	119.2	117.2	32.8	30.6
C_0/fF	591.7	616.4	289.9	291.7
L_m/μH	49.0	50.5	5.9	5.3
C_m/fF	3.16	3.09	0.96	1.07
R_m/Ω	47.4	41.1	64.1	65.5

为了分析锚点损耗对高频Lamb波谐振器的性能影响,研究分析了电极周期为2 μm,分别采用全支撑和窄支撑结构的Lamb波谐振器的导纳图和相位图,同时采用上述模型进行测试频谱的拟合并提取电学参数,如图10(*a*)和图10(*b*)所示. 与上文结论相同,支撑轴宽度对谐振频率和k_{eff}^2的影响较小,采用全支撑和窄支撑结构的Lamb波谐振器的f_s和k_{eff}^2分别为2.093 GHz和0.47%、2.091 GHz和0.55%. 但是谐振器的品质因数却与理论分析略微不同,采用窄支撑结构的Lamb波谐振器的Q_s值为1 044,略低于采用全支撑结构的Lamb波谐振器的1 192. 这一方面是因为高频谐振器的位移集中于压电振动结构的中心区域,通过支撑轴泄漏至衬底的能量极少,此时仅支撑结构不同的谐振器的动态电阻R_m值接近,分别为64.1 Ω和65.5 Ω;另一方面是因为,实际制造的窄支撑结构Lamb波谐振器在锚点的应力和应变较大,一定程度上造成谐振器Q_s值衰减. 值得注意的是,由于电极周期为2 μm的谐振器频率远大于电极周期为12 μm的谐振器,此时锚点损耗对谐振器Q值的影响相对较小,而声子间相互作用损耗占主导因素,进而造成前者的动态电阻R_m值均高于后者.



(*a*) 全支撑结构Lamb波谐振器 (*b*) 窄支撑结构Lamb波谐振器

图10 IDT周期为2 μm的Lamb波谐振器的测试导纳和相位曲线图

为了分析声子间相互作用损耗对Lamb波谐振器性能的影响，本文还研究了采用Au作为IDT材料，IDT周期为12 μm和2 μm的Lamb波谐振器，其导纳曲线如图11所示. Au、Al和AlN的热导率、比热容、声阻抗和密度等参数如表3所示[28]，相比于上文中的Al电极，Au的导热系数更高，因此采用Au-IDT的Lamb波谐振器的Akheiser损耗更大，并且该损耗随频率的增加而加剧. 另外，Au的声阻抗接近于AlN，相比于Al-IDT的Lamb波谐振器，声波在Au-IDT下方的幅值和相位的偏移量更大，这不仅会在目标模态附近产生部分难以抑制的杂散信号，同时也会造成IDT电极附近区域的温度升高. 此外，Au的导热系数更高、比热容更低，这会造成热传输时间降低，在谐振器内部产生温度梯度，进而加剧TED损耗. 但对于IDT周期为12 μm的Lamb波谐振器，其工作频率较低(f_s=362.9 MHz)，Akheiser损耗较低；同时其振动周期更长(大于热传输时间)，谐振器内部的温度梯度较小，TED损耗也相对较低. 因此声子间相互作用损耗对低频谐振器的Q值影响较小，相比于Al-IDT的Lamb波谐振器，其Q_s值从1 930衰减至1 578. 对于频率较高的Lamb波谐振器，谐振频率升高造成Akheiser损耗增大；同时振动周期缩短，造成振动周期与热传输时间更接近，进而加剧了TED损耗. 因此，相比于周期为2 μm的Al-IDT谐振器，在工作频率处(f_s=1 986.4 MHz)，其Q_s值从1 044衰减至48. 此外，相比于同周期的Al-IDT谐振器，Au-IDT谐振器的谐振频率均有所降低，这是因为Au的密度大于Al，会引起更明显的质量负载效应.

表3 Au、Al和AlN的材料参数

	Au	Al	AlN
热导率/(W/mK)	317	237	150
比热容/(KJ·(Kg·℃)$^{-1}$)	0.128	0.88	0.78
声阻抗/((MPa·s)·m^{-3})	21.7	8.4	19.6
密度/(kg·m^{-3})	193 000	2 700	3 260

通常，Lamb波谐振器的关键性能参数包括谐振频率、品质因数和动态阻抗等，且在不同应用领域所重点关注的性能参数不同. 在本文中，针对不同工作频段的Lamb波谐振器进行优化设计，有效抑制了锚点损耗和声子间相互作用损耗对Lamb波谐振器Q值的影响. 表4展示了本文制备的Lamb波谐振器与其他工作中的器件性能参数对比[29~32]. 实验结果表明，受益于谐振器结构的优化设计和先进可靠的微纳加工技术，所制备的电极周期为12 μm和2 μm的Lamb波谐振器在保证较低动态阻抗的同时，$f_s \times Q_s$值得以显著提升，分别达到1.04×10^{12}和2.49×10^{12}.

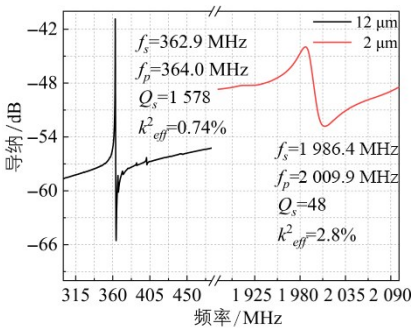


图11 表面电极材料为Au、IDT周期为12 μm和2 μm的Lamb波谐振器的导纳曲线图

表4 Lamb谐振器的关键性能参数对比

	文献[29]	文献[30]	文献[31]	文献[32]	本文
F_s/MHz	224.8	457.1	504.0	630.0	402.4
Q_s	2 400	1 150	1 647	1 380	2 590
R_m/Ω	160	38.8	104	389.0	41.1
$f_s \times Q_s$/(×10^{11})	5.39	5.25	8.30	8.69	10.4

5 总结

本文设计并研究了工作频率为400 MHz和2 GHz氮化铝Lamb波谐振器，通过理论分析、有限元仿真及实测结果验证等方法澄清了影响不同频段Lamb波谐振器Q值的主要损耗来源. 结果表明锚点损耗为低频谐振器的主要损耗来源，声子间相互作用损耗为高频谐振器的主要损耗来源. 本文所制备的Lamb波谐振器展现出了较高的Q值和纯净的频谱，在未来无线通信或传感领域极具应用前景.

参考文献

[1] 张旭东, 雷倩倩, 张芳玲, 等. 3阶FLFB低通滤波器的最小可接受功耗分析[J]. 电子学报, 2022, 50(6): 1480-1486. ZHANG X D, LEI Q Q, ZHANG F L, et al. Analysis of minimum acceptable power consumption of the 3rd follow-the-leader-feed back low pass filter[J]. Acta Electronica Sinica, 2022, 50(6): 1480-1486. (in Chinese)

[2] LE X H, SHI Q F, VACHON P, et al. Piezoelectric MEMS—Evolution from sensing technology to diversified applications in the 5G/Internet of Things (IoT) era[J]. Journal of Micromechanics and Microengineering, 2022, 32(1):

014005.

[3] 戴恩光. 基于高Q值SAW谐振器的多点频微波频率源的研究[J]. 电子学报, 2000, 28(5): 133-135.
DAI E G. Research on the mircrowake frequency synthesizer based upon high Q value SAW resonators[J]. Acta Electronica Sinica, 2000, 28(5): 133-135. (in Chinese)

[4] ZHAO Z N, QIAN Z H, YONG Y K. Frequency shift prediction of a shear mode multi-layered FBAR sensor in viscous media using transfer matrix method[J]. Applied Mathematical Modelling, 2021, 99: 555-565.

[5] FU J L, AYAZI F. High-Q AlN-on-silicon resonators with annexed platforms for portable integrated VOC sensing[J]. Journal of Microelectromechanical Systems, 2015, 24(2): 503-509.

[6] 诸政, 吕世涛, 张敖宇, 等. 环形氮化铝压电MEMS谐振器的支撑结构设计研究[J]. 传感器与微系统, 2022, 41(3): 24-27, 35.
ZHU Z, LÜ S T, ZHANG A Y, et al. Support structure design research of circular AlN piezoelectric MEMS resonator[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2022, 41(3): 24-27, 35. (in Chinese)

[7] SEGOVIA-FERNANDEZ J, PIAZZA G. Thermoelastic damping in the electrodes determines Q of AlN contour mode resonators[J]. Journal of Microelectromechanical Systems, 2017, 26(3): 550-558.

[8] HSU F C, HSU J C, HUANG T C, et al. Design of lossless anchors for microacoustic-wave resonators utilizing phononic crystal strips[J]. Applied Physics Letters, 2011, 98(14): 143505.

[9] HARRINGTON B P, ABDOLVAND R. In-plane acoustic reflectors for reducing effective anchor loss in lateral-extensional MEMS resonators[J]. Journal of Micromechanics and Microengineering, 2011, 21(8): 085021.

[10] LIN C M, LAI Y J, HSU J C, et al. High-Q aluminum nitride Lamb wave resonators with biconvex edges[J]. Applied Physics Letters, 2011, 99(14): 143501.

[11] SIDDIQI M W U, FEDELI P, TU C, et al. Numerical analysis of anchor loss and thermoelastic damping in piezoelectric AlN-on-Si Lamb wave resonators[J]. Journal of Micromechanics and Microengineering, 2019, 29(10): 105013.

[12] SCHAFFER Z A, COLOMBO L, KOCHHAR A S, et al. Experimental investigation of damping factors in 20% scandium-doped aluminum nitride laterally vibrating resonators[C]//2018 IEEE Micro Electro Mechanical Systems. Belfast: IEEE, 2018: 787-790.

[13] ZHU Y, WANG N, SUN C L, et al. A high coupling coefficient 2.3-GHz AlN resonator for high band LTE filtering application[J]. IEEE Electron Device Letters, 2016, 37(10): 1344-1346.

[14] MILLER J M L, ANSARI A, HEINZ D B, et al. Effective quality factor tuning mechanisms in micromechanical resonators[J]. Applied Physics Reviews, 2018, 5(4): 041307.

[15] RINALDI M, ZUNIGA C, PIAZZA G. 5-10 GHz AlN contour-mode nanoelectromechanical resonators[C]//2009 IEEE 22nd International Conference on Micro Electro Mechanical Systems. Sorrento: IEEE, 2009: 916-919.

[16] LUO T C, LIU Y, ZOU Y, et al. Design and optimization of the dual-mode lamb wave resonator and dual-passband filter[J]. Micromachines, 2022, 13(1): 87.

[17] LEE J E Y, YAN J Z, SESHIA A A. Study of lateral mode SOI-MEMS resonators for reduced anchor loss[J]. Journal of Micromechanics and Microengineering, 2011, 21(4): 045010.

[18] KHINE L, PALANIAPAN M. High-Qbulk-mode SOI square resonators with straight-beam anchors[J]. Journal of Micromechanics and Microengineering, 2009, 19(1): 015017.

[19] AKHIEZER A. On the absorption of sound in solids[J]. Journal of Physics-Ussr, 1939, 1(1): 289-298.

[20] TU C, LEE J E Y. Thermoelastic dissipation in etch-hole filled lamé bulk-mode silicon microresonators[J]. IEEE Electron Device Letters, 2012, 33(3): 450-452.

[21] DUWEL A, CANDLER R N, KENNY T W, et al. Engineering MEMS resonators with low thermoelastic damping[J]. Journal of Microelectromechanical Systems, 2006, 15(6): 1437-1445.

[22] CHEN Z J, WANG T Y, JIA Q Q, et al. A Novel Lamé Mode RF-MEMS resonator with high quality factor[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2021, 204: 106484.

[23] CASTILLA D, MUÑOZ M, SINUSÍA M, et al. Large asymmetry in the magnetoresistance loops of ferromagnetic nanostrips induced by Surface Acoustic Waves[J]. Scientific Reports, 2021, 11: 8586.

[24] SUN H Y, LV S T, ZHANG A Y, et al. High quality-factor and spectrum-clean AlN lamb-wave resonators with optimized lateral reflection boundary conditions and transducer design[J]. Micromachines, 2022, 13(5): 779.

[25] ZUO C J, SINHA N, VAN DER SPIEGEL J, et al. Multi-frequency pierce oscillators based on piezoelectric AlN

contour-mode MEMS technology[J]. Journal of Microelectromechanical Systems, 2010, 19(3): 570-580.

[26] BHUGRA H, PIAZZA G. Piezoelectric MEMS Resonators[M]. Cham: Springer International Publishing, 2017.

[27] ESTEVES G, YOUNG T R, TANG Z C, et al. Al0.68Sc0.32N Lamb wave resonators with electromechanical coupling coefficients near 10.28%[J]. Applied Physics Letters, 2021, 118(17): 171902.

[28] ZOU J, LIN C M, LAM C S, et al. Transducer design for AlN Lamb wave resonators[J]. Journal of Applied Physics, 2017, 121(15): 154502.

[29] CASSELLA C, SINGH N, SOON B W, et al. Quality factor dependence on the inactive regions in AlN contour-mode resonators[J]. Journal of Microelectromechanical Systems, 2015, 24(5): 1575-1582.

[30] BASSIRIAN P, MOODY J, LU R C, et al. Nanowatt-level wakeup receiver front ends using MEMS resonators for impedance transformation[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2019, 67(4): 1615-1627.

[31] LU R C, MANZANEQUE T, BREEN M, et al. Piezoelectric RF resonant voltage amplifiers for IoT applications [C]//2016 IEEE MTT-S International Microwave Symposium. San Francisco: IEEE, 2016: 1-4.

[32] LI J C, CHEN Z J, LIU W L, et al. A novel piezoelectric RF-MEMS resonator with enhanced quality factor[J]. Journal of Micromechanics and Microengineering, 2022, 32(3): 035002.

作者简介

赵继聪 男，1989年出生于江苏南通．2017年获中国科学院半导体研究所博士学位．现任南通大学江苏省专用集成电路设计重点实验室副教授．主要研究方向为射频MEMS谐振器件及微系统集成封装．

E-mail: jczhao@ntu.edu.cn

吕世涛 男，1999年出生于安徽滁州．现为南通大学信息科学技术学院硕士研究生．主要研究方向为射频微纳谐振器件．

E-mail: lst@stmail.ntu.edu.cn