

压电 MEMS 兰姆波器件技术的最新进展与展望

于晓权¹,何杰²,马晋毅²

(1. 中国电子科技集团公司 第二十四研究所,重庆 400060;2. 中国电子科技集团公司 第二十六研究所,重庆 400060)

摘 要:兰姆波谐振器(LWR)作为一种新兴的压电微机电系统(MEMS)声学器件,同时具有高工作频率、高机电耦合系数、高品质因数及低功耗等特点,其制造工艺与集成电路工艺兼容,可在单片晶圆上实现多频率器件。基于 LWR 的声学滤波器是实现高性能射频前端组件的有效解决方案之一,能够满足未来通信设备多频率及集成化的发展要求,其相关研究已成为微声器件领域的热点。该文简要介绍了兰姆波的基本原理,综述了近年来基于氮化铝(AIN)薄膜和铌酸锂薄膜(LNOD)的压电 MEMS 兰姆波器件研究取得的最新成果,并讨论了压电 MEMS 兰姆波器件的发展趋势。

关键词:兰姆波谐振器(LWR);压电微机电系统(MEMS);横向激励声体波谐振器(XBAR);高次谐波组合模式谐振器(CORs);截面拉梅模式谐振器(CLMRs)

中图分类号:TN384;TN65;TN713 文献标志码:A

Recent Advances and Prospects of Lamb Wave Devices Based on Piezo-MEMS

YU Xiaoquan¹, HE Jie², MA Jinyi²

(1. The 24th Research Institute of China Electronics Technology Corporation, Chongqing 400060, China;

2. The 26th Research Institute of China Electronics Technology Corporation, Chongqing 400060, China)

Abstract: As an emerging piezoelectric micro-electro-mechanical system (MEMS) acoustic device, the Lamb wave resonator has the features of high operating frequency, high k_t^2 , high Q and low power consumption simultaneously. Its process is compatible with the integrated circuits and is promising to realize multi-frequency devices on a single wafer. The acoustic filter based on the Lamb wave resonator is one of the effective solutions to realize high-performance RF front-end modules, which can meet the development requirements of multi-frequency and integration of communication equipment in the future, thus the research on the Lamb wave devices has become a hot spot in the field of micro-acoustic devices. In this paper, the basic principle of the Lamb wave is introduced. The latest achievements in the research on piezoelectric MEMS Lamb wave devices based on AlN thin films and lithium niobate thin films (LNOD) in recent years are reviewed. Finally, the development trends of piezoelectric MEMS Lamb wave devices are discussed.

Key words: Lamb wave resonator; piezoelectric micro-electro-mechanical system (MEMS); laterally-excited bulk-wave resonators (XBAR); combined overtone resonators (CORs); cross-sectional-Lamé-mode resonator (CLMRs)

0 引言

工作在射频(RF)和微波频段的压电声学器件一直受到研究和商业机构的广泛关注^[1-2]。随着 5G 通信的发展及物联网(IoT)时代的到来,6 GHz 以下(sub-6GHz)的低、中频带逐渐饱和。6 GHz 以上的高频段应用要求信号处理器件同时具有低插损、大带宽和低温漂等特性。目前的主流技术声表面波(SAW)和声体波(BAW)器件受工艺能力和压电材料(铌酸锂/钽酸锂块材和氮化铝(AIN)薄膜)机电

耦合系数(k_t^2)的限制,实现的声学器件工作频率一般小于 6 GHz(sub-6GHz),难以完全满足新兴的 5G 通信及 IoT 应用对射频系统提出的严苛要求。

兰姆波谐振器(LWR)是一种新兴的压电微机电系统(MEMS)(piezo MEMS)声学谐振器,具有较高的品质因数(Q)、适当的 k_t^2 、低损耗及小体积等优势。LWR 由叉指换能器(IDT)和压电薄膜构成,当信号通过电极施加于压电薄片材料时,兰姆波被激发并在薄片内传播、反射,最终形成驻波引发谐振。LWR 可采用和 SAW 谐振器类似的叉指电极

收稿日期:2022-04-08

作者简介:于晓权(1981-),男,黑龙江省人,高级工程师,硕士,主要从事半导体芯片技术的研究。

结构来实现声波的电激励,谐振频率由电极间的宽度决定;同时,LWR的制作可利用现有成熟的体声波(BAW)(薄膜体声波谐振器/固态装配型谐振器(FBAR/SMR))技术平台。因此,LWR兼具SAW谐振器和BAW谐振器二者的特征。

本文简要介绍了兰姆波的基本原理,重点报道了基于不同材料平台的5G通信和IoT用兰姆波器件取得的最新研究成果,并展望了未来的发展趋势。

1 兰姆波基本原理

1917年,英国科学家Horace Lamb最先预测了兰姆波的存在,随后实验证实这是一种在板状固体结构中传播的超声导波^[3]。兰姆波是当激励波波长与波导厚度处于同一数量级时,由横波和纵波耦合而成的一种特殊形式的应力波。兰姆波在一定厚度的薄板中传播,其质点在薄板的中间和两面振动,声场遍及整个板厚,因此可认为兰姆波是一种声板波(PAW)。根据声波传播时介质中质点振动位移分布形态的不同,兰姆波分为反对称型兰姆波(A型)和对称型兰姆波(S型)两种(见图1)^[3]。

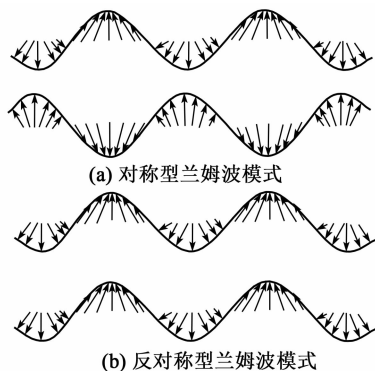


图1 兰姆波传播模式示意图

对称型兰姆波的特点是薄板中质点的振动对称于板的中心面,上下两面相应质点振动的水平分量方向相同,而在垂直分量方向相反,且在薄板的中心面上质点以纵波形式振动;反对称模式兰姆波的特点是薄板中质点的振动不对称于板的中心面,上下两面相应质点振动的垂直分量方向相同,水平分量方向相反,且在薄板的中心面上质点以横波形式振动。对称与反对称模式兰姆波的薄板上下表面质点均做椭圆运动。兰姆波有多阶对称和反对称模式,对称模式兰姆波从低阶到高阶常用 S_0 、 S_1 、 S_2 、 S_3 、 $\dots$ 、 S_n 表示,反对称模式兰姆波从低阶到高阶常用 A_0 、 A_1 、 A_2 、 A_3 、 $\dots$ 、 A_n 表示。不同模式的兰姆波具有不同声速,其中最低阶兰姆波的声速一般在10 000 m/s,而高阶兰姆波声速大于10 000 m/s。

由于兰姆波声速高,因此,采用兰姆波作为工作模式有利于声波器件的频率扩展和器件的小型化。

在LWR的研究中,最早应用的压电材料AlN由于压电系数 d_{31} 较小,AlN LWR可实现的 k_t^2 为2%~3%,因此,采用AlN LWR实现的滤波器难以满足大带宽要求。此外,早期的LWR大多工作在低阶模式(S_0 模式及零阶水平剪切(SH_0)模式)^[4]。随着晶体离子注入剥离(CIS)技术和晶圆键合技术相结合的键合剥离(Smart-Cut)薄膜层转移制备技术的成熟,采用Smart-Cut技术能够制备出亚微米厚的铌酸锂薄膜(LNOI)材料^[5-6]。LNOI同时具有高 k_t^2 、高 Q 及更高的优值($FOM = k_t^2 \times Q$)等特点,可用于实现高频、高 Q 及高 k_t^2 的兰姆波器件。

2013年,美国伊利诺伊大学厄巴纳香槟分校的SongbinGong团队采用离子注入剥离X-切铌酸锂薄膜设计,制作了中心频率为530 MHz的LWR,器件工作在 S_0 模式, k_t^2 可达11.5%, Q 可达1 800,频率温度系数(TCF)为 $(-55 \sim -69) \times 10^{-6}/K$,能够满足宽带射频(RF)滤波器的应用要求^[7]。图2为X-切铌酸锂LWR模型、位移模式及电路模型。这类具有高 k_t^2 和 Q 的谐振器为频率捷变和自适应射频滤波器技术提供了一个优良的平台,能用于制备可重构RF前端用多频率宽带多工器和滤波器组。

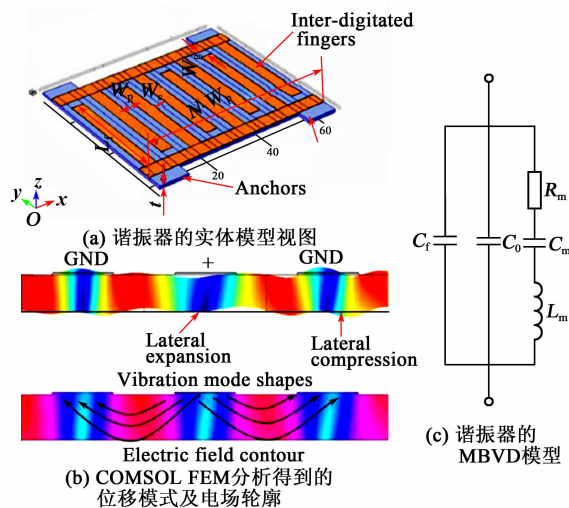


图2 X-切铌酸锂LWR模型、位移模式及电路模型

2018年,卡内基·梅隆大学的詹卢卡·皮亚萨(Gianluca Piazza)团队报道了一种 S_0 模式X-切(30° -YZ)铌酸锂(LN)横向振动谐振器(LVR)^[8],图3为器件的拓扑结构和等效电路。基于这种谐振器实现的谐振器阵列的 $Q = 1\,976$, $k_t^2 = 29.5\%$, $FOM = 570$;而在真空环境下检测到单个谐振器的 $Q = 5\,110$, $k_t^2 = 30.7\%$, $FOM = 1\,560$ 。该谐振器适

合超低功耗的应用场景,如 IoT 和唤醒无线电接收机(WuRx),但器件的寄生模式仍需进一步优化。

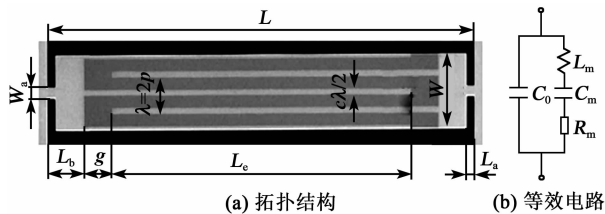


图3 S_0 模式铌酸锂横向振动谐振器的拓扑结构和等效电路

SiC 具有相速度高,声损耗低,热导率高等特性,在低功耗、小型化和高频应用场景中具有极大的优势。上海微系统与信息技术研究所利用剥离转移工艺将 X-切 LiNbO_3 单晶薄膜与高声速、高导热的 SiC 支撑衬底异质集成,制备出一种新型的 LNOSiC(LiNbO_3 -on-SiC)多层结构材料^[9-10]。基于这种材料实现的 S_0 模式 LWR 的相速度达到了 $5\,980\sim 6\,700\text{ m/s}$, k_t^2 为 $17.4\%\sim 22.8\%$, 谐振频率为 $4.1\sim 6.0\text{ GHz}$, 制作的兰姆波梯形滤波器中心频率 f_c 可达 6.12 GHz , 插入损耗 IL 为 2.35 dB , 3 dB 相对带宽 FBW 为 7.89% , 如图 4 所示。这种 LNOSiC 兰姆波滤波器可用于实现高频、大带宽、小型化 5G 射频前端。

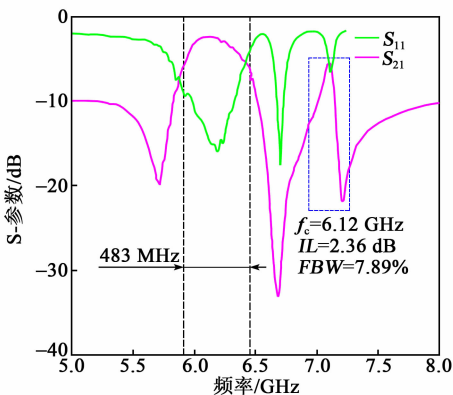


图4 LNOSiC 兰姆波滤波器的 S 参数

零阶水平剪切(SH_0)模式铌酸锂 LWR 具有最大的 k_t^2 (在铌酸锂特定切型和厚度条件下, $k_t^2 > 50\%$), 这不仅是一种极有希望的新兴超宽带应用解决方案, 而且还是下一代可重构滤波器的重要候选解决方案。

瑞士洛桑联邦理工大学(EPFL)大学先进 NEMS 实验室通过研究谐振器的非作用区域(底切、锚、汇流条和指条-汇流条间距)对 Q 值的影响, 确定了这些区域能防止能量从谐振体泄漏的最佳尺寸。结果表明, 更长的非作用区域有利于提高谐振器的 Q 值^[11]。此外, 他们还开发出了一种能够更好地

地控制器件释放区域的形状和尺寸的新型工艺, 采用博世公司的 Si 离子刻蚀(DRIE)工艺从背面释放器件, 实现了底切的精确确定, 从而保证器件的 Q 值稳定且可重现。实现的 SH_0 模式 X-切铌酸锂谐振器的 Q 值可达 1 900, 在 290 MHz 时, $k_t^2 = 41\%$, $FOM = 780$, 是已有报道中 SH_0 模式 LWR 的最高优值。图 5 为谐振器结构的俯视图^[11]。

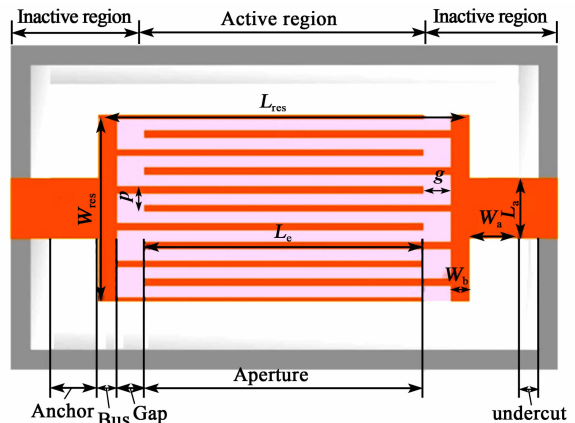


图5 SH_0 模式 LWR 结构俯视图

综上所述, LWR 极有潜力成为未来低功耗、多功能、小型化频率器件的最佳解决方案。

2 高阶兰姆波器件技术的最新进展

虽然低阶兰姆波模式(S_0 、 SH_0)器件能够实现较高的 k_t^2 , 但低阶模式相速度不大(S_0 、 SH_0 模式下相速度分别为 $6\,000\text{ m/s}$ 、 $3\,500\text{ m/s}$), 光刻精度不足的条件实现高频率较难。在 $3\sim 5\text{ GHz}$ 工作时, 低阶模式兰姆波器件将产生 IDT 烧毁、电子迁移、大电极电阻及制作难等问题。高阶兰姆波模式在一定的薄膜厚度范围内具有良好的机电耦合性能、高的相速度和 Q 值, 拥有实现更高频率谐振器和滤波器的潜力, 无需在一些关键参数上折中, 有望在 5G 高频段($6\text{ GHz}\sim$ 毫米波频段)实现传统声学滤波技术难以实现的高耦合系数谐振器和高频、大带宽滤波器, 被认为是最有希望满足 5G 通信应用要求的竞争性解决方案之一。

2.1 X~Ka 波段 AlN 芯片级兰姆波器件

美国东北大学的一个研究团队提出了一种称之为 AlN“高次谐波组合模式谐振器(CORs)”方案, AlN CORs 基于二阶反对称兰姆波模式(A_2)和三阶反对称兰姆波模式(A_3)的多模式激励工作, 能够产生更高的谐振频率, 从而满足 5G 高频带($6\sim 40\text{ GHz}$)应用。图 6 为 AlN CORs 的兰姆波模式形状^[12-14], AlN 厚为 $1\text{ }\mu\text{m}$, 间距 $W = 1\text{ }\mu\text{m}$ 。制作 CORs 对光刻的要求较宽(特征尺寸 $> 100\text{ nm}$), 采

用的 AlN 薄膜较厚(>220 nm),消除了采用超薄薄膜材料带来的性能劣化问题,同时还能实现高 Q 值,此外,CORs 虽采用了高阶模式结构,但其 k_t^2 仍相对较高($0.8\%\sim 1.9\%$)。因此,毫米波 CORs 可同时实现高 Q 值(在 10 GHz 时 $Q>1\,000$)和高 k_t^2 ($0.8\%\sim 1.9\%$),可在同一衬底上实现 $24\sim 40$ GHz 的滤波器($355\sim 592$ MHz 的带宽)。

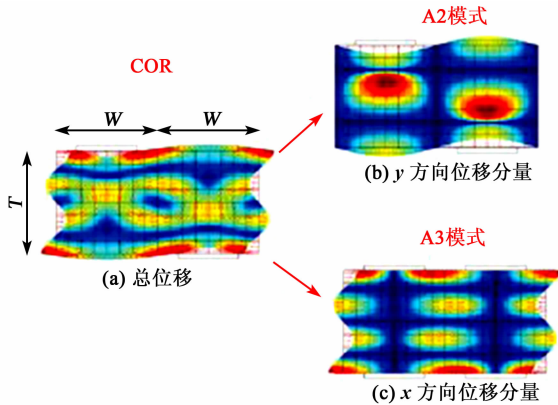


图6 AlN CORs 的兰姆波模式形状

“X~Ka 波段芯片级滤波器”完成的第一个 CORs 原型样机采用横向场(LFE)结构,工作频率为 8.8 GHz 时,其机械 Q 值(Q_m)和负载 Q 值(Q_l)分别为 $1\,100$ 和 750 ,对应的频率与品质因数之积 $f\times Q_m$ 可达 9.7×10^{12} , $f\times Q_l$ 可达 6.6×10^{12} ,器件的终端阻抗约为 $50\,\Omega$,动态电阻为 $20\,\Omega$, $k_t^2=0.3\%$,可通过改变间距实现频率调谐^[13]。图 7 为 LFE CORs 的 SEM 照片,器件由一个 8 谐振器阵列构成,以获得匹配 $50\,\Omega$ 终端的高静态电容值^[13]。图中, p 为 IDTs 指条的间距。器件采用了较简单的双层掩模(2-mask)制作工艺,放宽了对光刻要求,可用于实现低成本 X 波段窄带滤波器和振荡器。

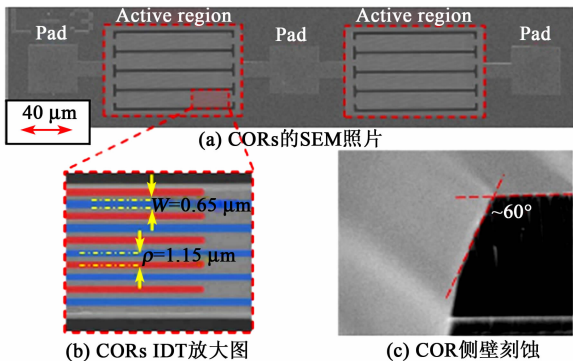


图7 横向场结构 CORs 的扫描电镜显微照片

美国东北大学 SMART 中心和思佳讯公司的一个联合团队研制出第一个工作在 $5G$ 毫米波频段 AlN CORs^[14]。CORs 采用 A_2 、 A_3 多模式激励,

AlN 薄膜厚为 389 nm,顶电极采用横向场结构,谐振器工作频率为 23.2 GHz,测得 $k_t^2=0.46\%$, $Q_m=254$, $f\times Q>6\times 10^{12}$ 。图 8 为器件的扫描电镜显微照片,图中可看到释放的 60 根指条。晶圆级频率调谐能力和高性能的结合使 CORs 有希望成为未来 $5G$ 毫米波前端架构用低损耗微型化多频率滤波器的一种候选方案。

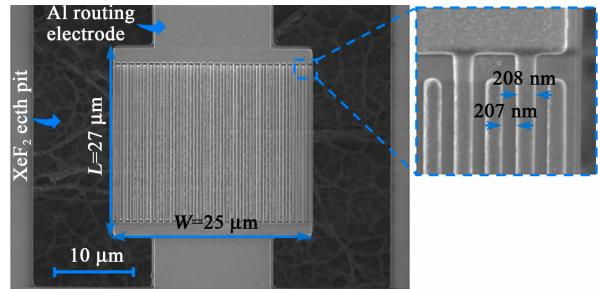


图8 COR 的扫描电镜显微照片

截面拉梅模式谐振器(CLMRs)通过压电薄片的压电常数 e_{31} 和 e_{33} 的相干组合来实现二维(2D)机械振动模式,这种振动是一种沿 AlN 薄片的宽度和厚度的纵向振动,利用这一特性可实现具有高 k_t^2 (理论值可达 7%)的谐振器。由于谐振频率由 AlN 薄片厚度和 IDTs 的指条间距决定,因此可在同一基板上采用光刻工艺制备不同工作频率的 CLMRs,不会增加工艺的复杂度^[15-16]。CLMRs 采用厚度场(TFE)和 LFE 两种主要的激励策略来激励压电薄片中的截面拉梅模式(CLMs)。LFE 结构采用单电极层结构(通常不采用底电极 IDTs),TFE 采用双电极层的三明治结构,上下两个相同的 IDTs 中间夹持一层 AlN 薄膜,IDTs 指条间距 p 与 AlN 层厚度相等。在指条间距与 AlN 层厚度的比值相同的条件下,LFE 结构的 k_t^2 较 TFE 结构的 k_t^2 低,但制作复杂度也较低。图 9 为 TFE 和 LFE 激励的 CLMRs 结构^[15]。对于载波聚合应用平台,CLMR 技术是实现单片集成连续或非连续预选滤波器的最有希望的解决方案之一。

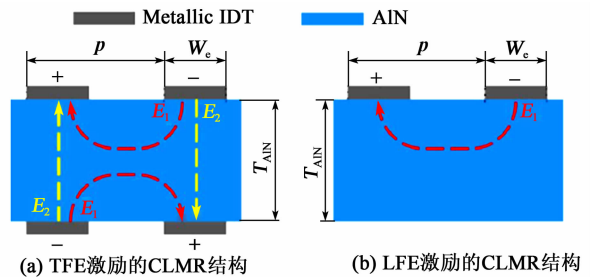


图9 CLMRs 的两种主要激励策略

2020 年,美国东北大学 SMART 中心和思佳讯公司的联合团队报道了一种采用 LFE 激励的 AlN

CLMR, 谐振器工作频率为 11 GHz, $Q_1 = 615$, $k_1^2 = 1.3\%$, $FOM = 8$ ^[17]。报道的这种 11 GHz CLMR 技术为研制新一代高频(大于 6 GHz)无线通信用低损耗、微型化滤波器提供了新的可能性。器件采用双掩模(2-mask)工艺制作, 图 10 为器件制作的工艺流程。

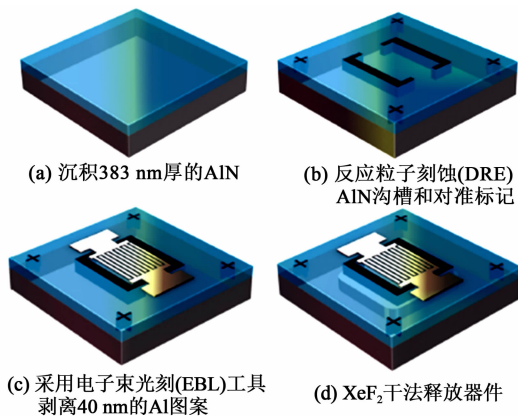


图 10 ALN CLMR 制作工艺流程

虽然 AlN LWR 可覆盖 10 MHz~10 GHz 的频率范围, 且具有小于 50 Ω 的低动态电阻及 Q 值高达 4 000 的优良特性, 但目前普遍实现的 k_1^2 仅为 2%~3%, 约为 FBAR k_1^2 的 1/3。因此, AlN LWR 技术更适合窄带滤波器和振荡器应用。

2.2 铌酸锂薄膜高阶模式兰姆波器件

高压电系数的铌酸锂有利于实现高耦合系数的谐振器, 从而实现大带宽滤波器。利用 LN 单晶薄膜的某些特定切向可实现具有极高 k_1^2 和较高 Q 值的 LWR。

A_1 兰姆波模式具有高相速度、大 k_1^2 及高 Q 值。2020 年, 美国伊利诺伊大学厄巴纳-香槟分校的 Songbin Gong 团队验证了 128°Y-切铌酸锂薄膜 A_1 模式 LWR 的 k_1^2 可达 46.4%, 在 3.2 GHz 时 Q 值最大为 598, 可用于实现 5G 新空口(NR)用宽带声学滤波器^[18]。

采用横向激励声体波谐振器(XBAR)技术有望解决 SAW/BAW 在 5G 时代面临的困境。XBAR 基于绝缘体上铌酸锂单晶薄膜(LNOI)实现, 工作在反对称型兰姆波模式, 采用类似于 SAW IDT 结构来激励铌酸锂单晶薄片内的纵向剪切振动模式, 而悬空的 LNOI 则更像 FBAR 器件^[19]。XBAR 的实现, 得益于铌酸锂薄膜层转移技术的成熟和微纳加工工艺的进步。对 XBAR 的实验研究表明, XBAR 的主剪切谐振为 4.55 GHz, 三次谐波在 13 GHz 附近, 剪切体波 A_1 模式的相对带宽约 11%, 有效机电耦合系数 k_{eff}^2 约为 25%, 完全满足移

动通信频率 4~6 GHz 的要求, 甚至无需严苛的光刻条件就能将频率扩展为 10~25 GHz。在实现 3~6 GHz 工作频率的 5G 新空口用滤波器以及工作频率大于 28 GHz 的毫米波系统应用方面, XBAR 技术拥有巨大潜力。图 11 为 XBAR 结构的关键特性^[19]。



图 11 XBAR 结构的关键特性

2019 年, 谐振公司(Resonant Inc.)的维克多·普莱斯基(Victor Plessky)团队研制了第一个基于 Z-切铌酸锂单晶薄膜的 XBAR^[20], 器件工作在 A_1 兰姆波模式, 工作频率为 5 GHz, k_1^2 达到 25%, Q 约为 300, 适合高频、大带宽 5G 声学滤波器应用。XBARs 可采用标准的光刻工艺和 MEMS 工艺实现, 图 12 为 XBAR 器件的结构示意图^[20], 这是谐振公司(Resonant Inc.)实现的第一代 XBARs。

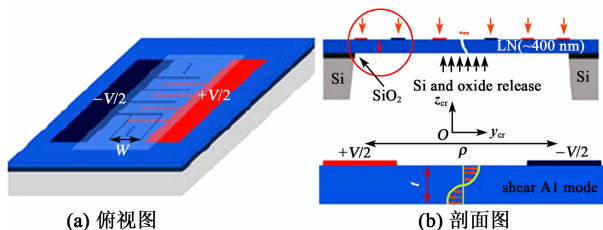


图 12 XBAR 器件结构图

改进后的第二代 XBARs 器件制作工艺采用 3 层掩模工艺^[21], 首先采用电子束光刻和剥离工艺制作电极, 然后采用深反应离子刻蚀(DRIE)进行 Si 刻蚀, 以释放铌酸锂薄片, 而不是先释铌酸锂薄膜, 再进行电子束光刻制备电极。此外, 新工艺采用在硅载体晶圆上直接键合厚 400 nm 的 LiNbO_3 单晶薄膜实现 LiNbO_3/Si 结构, 而不是在 LiNbO_3 和 Si 层间采用 SiO_2 夹层结构, 这就无需采用湿法刻蚀工艺去除 SiO_2 , 且采用 LiNbO_3 薄膜释放工艺可获得更小的应力。因此, 采用新工艺制备的器件的良率超过 90%。图 13 为改进后的 XBARs 制作工艺^[21]。虽然器件采用电子束光刻制作, 但由于电极的线宽尺寸足够大(特征尺寸为 500 nm), 因此可采

用深紫外光刻替代电子束光刻,从而有利于实现器件的批量生产。

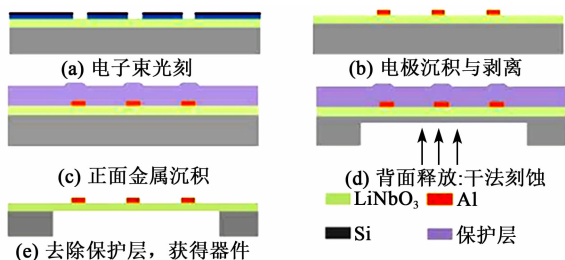


图 13 改进后的 XBARs 制作工艺

2022 年 2 月 15 日,日本村田制作所宣布斥资 3 亿美元收购 Resonant 公司(Resonant Inc.)。由于 XBAR 滤波器技术方案能够有效解决下一代网络所面临的复杂需求,此次收购村田制作所将实现村田领先的移动射频产品能力与 Resonant 公司一流的 XBAR 滤波器解决方案二者的良好结合,从而在声学滤波器市场上进一步甩开竞争对手的追赶,发挥先发优势迅速占领市场高地。

为了实现较高的耦合系数,在大多情况下,压电薄膜厚度与波长的比值很小,这使铌酸锂高阶模式谐振器的频率几乎只与厚度相关,难以通过叉指实现较大范围的频率调整(约数百赫兹)^[22]。为此,美国伊利诺伊大学厄巴纳-香槟分校的 Songbin Gong 团队提出了一种采用局部减薄工艺方案,该方案采用刻蚀法使部分压电薄膜减薄,以实现高频谐振器。图 14 为采用这种局部减薄工艺实现的 A_5 模式兰姆波滤波器制造工艺流程^[22]。

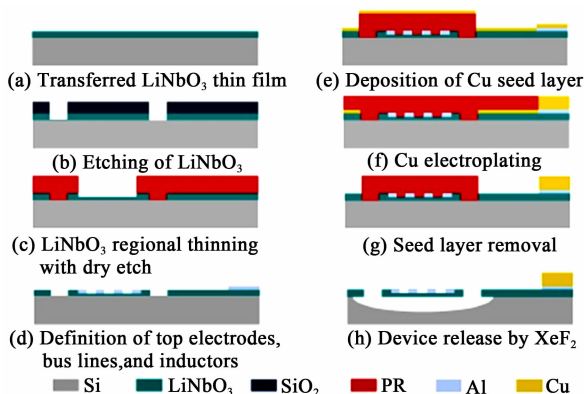


图 14 采用局部减薄的 LiNbO_3 兰姆波滤波器工艺流程

兰姆波滤波器制造工艺流程如下:转移的 LiNbO_3 薄膜衬底如图 14(a)所示。使用 ICP-RIE 工艺刻蚀释放孔,如图 14(b)所示。对部分区域的 LiNbO_3 薄膜进行减薄,如图 14(c)所示。沉积顶电极和电感等如图 14(d)所示。沉积和定义用于减小互连线,如图 14(e)~(g)所示。气相刻蚀释放器件

如图 14(h)所示。该工艺通过控制 LiNbO_3 薄膜不同区域的厚度实现了不同器件的工作频率,进而实现了同一衬底上构建滤波器的目的。

基于这种局部减薄工艺,该团队采用 650 nm 厚的 Z-切铌酸锂薄膜设计并制作了工作在 X 波段的 A_3 、 A_7 模式的兰姆波滤波器^[23-24],其 3 dB 带宽分别为 190 MHz 和 170 MHz,插入损耗分别为 1.5 dB 和 2.5 dB,芯片面积分别为 0.56 mm² 和 1 mm²;实现在 19 GHz 时 A_7 模式兰姆波滤波器的 3 dB 带宽为 2.4%,芯片面积为 1.4 mm²。

Songbin Gong 团队的研究验证了利用先进的薄膜加工技术和高频振动模式实现工作频率大于 6 GHz 的高性能微声滤波器是一种很有希望的解决方案。

3 兰姆波器件技术的未来发展趋势

目前 AlN 材料平台发展已较成熟,提高 AlN 掺杂材料的成熟度是 AlN 材料平台面临的主要挑战。同时,探寻 AlN 材料新的谐振模式以实现工作在 X~Ka 波段的芯片级滤波器是 AlN 微声器件未来的发展方向。

晶体离子注入剥离(CIS)技术和晶圆键合技术相结合的键合剥离(Smart-Cut)薄膜层转移制备技术使制备高频、大带宽和高 k_t^2 的铌酸锂薄膜器件成为可能,虽然工作在 13 阶兰姆波模式的 60 GHz 铌酸锂薄膜器件已获得验证^[25],但微加工技术仍是铌酸锂薄膜器件设计面临的主要挑战。因此,铌酸锂薄膜器件制作工艺的突破^[26]和新结构设计将是铌酸锂薄膜器件未来的研究方向之一。此外,铌酸锂薄膜器件中的电磁(EM)效应是器件设计时不可忽略的因素,要实现器件的高频扩展而不降低 k_t^2 ,声学结构和 EM 结构的协同设计也是实现高频、大带宽铌酸锂兰姆波器件的一种选择方案^[27-29]。未来铌酸锂薄膜兰姆波器件仍将进一步向前发展,而铌酸锂薄膜材料也将成为一个实现高性能声学器件的通用声学材料平台。

4 结束语

本文综述了压电兰姆波器件技术的最新研究进展,并展望了未来的发展方向。压电 MEMS 兰姆波器件可以借鉴 SAW 器件的设计原理,并利用 FABR 的工艺平台制作,兼具 SAW 和 FBAR 二者的特征。未来无线通信高频化和大带宽的发展趋势

要求信号处理器件的频率达到几十吉赫兹,相对带宽需达到 24%^[30],因此,兰姆波器件的性能参数还需要进一步优化,提高工作频率、拓展带宽是未来重要的研究方向。解决上述问题的潜在可能性是突破现有的制造工艺限制并采用超高相速(声速)的薄膜材料。

参考文献:

- [1] HAGELAUER A, FATTINGER G, RUPPEL C C W, et al. Microwave acoustic wave devices; recent advances on architectures, modeling, materials, and packaging [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2018, 66(10): 4548-4562.
- [2] CHAUHAN V, HUCK C, FRANK A, et al. Enhancing RF bulk acoustic wave devices [J]. IEEE Microwave Magazine, 2019, 20(10): 56-70.
- [3] SU Zhongqing, YE Lin, LU Ye. Guided Lamb waves for identification of damage in composite structures: A review [J]. Journal of Sound and Vibration, 2006, 295: 753-780.
- [4] YANTCHEV V, KATARDJIEV I. Thin film Lamb wave resonators in frequency control and sensing applications: A review [J]. Journal of Micromechanics and Microengineering, 2013, 23(4): 1-14.
- [5] 何杰, 马晋毅, 胡少勤, 等. 基于 LN/LT-POI 多层结构的 SAW 器件发展 [J]. 压电与声光, 2020, 42(6): 864-870.
HE Jie, MA Jinyi, HU Shaoqin, et al. Development of SAW devices on LN/LT-POI multilayered structure [J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2020, 42(6): 864-870.
- [6] 张涛, 何杰, 胡少勤, 等. 集成铌酸锂光子器件技术的研究进展 [J]. 压电与声光, 2020, 42(6): 837-842.
ZHANG Tao, HE Jie, HU Shaoqin, et al. Current-progress of integrated lithium niobate photonic device technology [J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2020, 42(6): 837-842.
- [7] GONG Songbin, PIAZZA G. Design and analysis of lithium-niobate-based high electromechanical coupling RF-MEMS resonators for wideband filtering [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2013, 61(1): 403-414.
- [8] PIAZZA G, COLOMBO L, KOCHHAR A, et al. X-cut lithium niobate laterally vibrating MEMS resonator with figure of merit of 1 560 [J]. Journal of Microelectromechanical Systems, 2018, 27(4): 602-604.
- [9] ZHOU Hongyan, ZHANG Shibin, LI Zhongxu, et al. Surface wave and Lamb wave acoustic devices on heterogeneous substrate for 5G front-ends [C]//San Francisco, USA; IEEE International Electron Devices Meeting (IEDM), 2020: 1-4.
- [10] ZHOU Hongyan, ZHANG Shibin, ZHENG Pengcheng, et al. A 6.1 GHz wideband solidly-mounted acoustic filter on heterogeneous substrate for 5G front-ends [C]//Tokyo, Japan; IEEE 35th International Conference on Micro Electro Mechanical Systems Conference (MEMS), 2022: 1006-1009.
- [11] FAIZAN M, VILLANUEVA L G. Optimization of inactive regions of lithium niobate shear mode resonator for quality factor enhancement [J]. Journal of Microelectromechanical Systems, 2021, 30(3): 369-374.
- [12] CHEN Guofeng, RINALDI M. High-Q X band aluminum nitride combined overtone resonators [C]//Orlando, USA; Joint Conference of the IEEE International Frequency Control Symposium and European Frequency and Time Forum (EFTF/IFC), 2019: 1-4.
- [13] CHEN Guofeng, RINALDI M. Aluminum nitride combined overtone resonators for the 5G high frequency bands [J]. Journal of Microelectromechanical Systems, 2020, 29(2): 148-159.
- [14] ASSYLBEKOV M, CHEN Guofeng, PIRRO M, et al. Aluminum nitride combined overtone resonator for millimeter wave 5G applications [C]//Gainesville, USA; IEEE 34th international conference on micro electro mechanical systems (MEMS), 2021: 202-205.
- [15] CASSELLA C, YU Hui, RINALDI M, et al. Aluminum nitride cross-sectional Lamé mode resonators [J]. Journal of Microelectromechanical Systems, 2016, 25(2): 275-285.
- [16] SCHAFFER Z A, PIAZZA G, MISHIN S, et al. Super high frequency simple process flow cross-sectional Lamé mode resonators in 20% scandium-doped aluminum nitride [C]//Vancouver, Canada; IEEE 33rd International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS), 2020: 1281-1284.
- [17] ASSYLBEKOVA M, CHENY G F, MICHETTI G, et al. 11 GHz lateral-field-excited aluminum nitride cross-sectional Lamé mode resonator [C]//Keystone, USA; Joint Conference of the IEEE International Frequency Control Symposium and International Symposium on Applications of Ferroelectrics (IFCS-ISAF), 2020: 1-4.