

基于 X-LiNbO₃/SiO₂/Si 低温漂、大机电耦合 SH-SAW 谐振器的设计

温福军^{1,2}, 王园园^{1,2}, 钱莉荣^{1,2}, 王荔田^{1,2}, 李翠平^{1,2}, 熊阳^{1,2}, 田亚会³, 李红浪⁴

(1. 天津理工大学 集成电路科学与工程学院, 薄膜电子与通信器件天津市重点实验室, 天津 300384;

2. 天津理工大学 光电器件与通信技术教育部工程研究中心, 天津 300384;

3. 中国科学院声学研究所, 北京 100190; 4. 国家纳米科学中心, 北京 100190)

摘要: 铌酸锂(LN)单晶薄膜具有较高的机电耦合系数($k_{\text{eff}}^2 > 30\%$), 其水平剪切(SH)声学模式常被应用于开发具有大机电耦合系数的薄膜声学谐振器和超宽带滤波器。但 LN 的频率温度系数较大($TCF > -50 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$), 这不仅会降低滤波器的可用有效带宽, 同时也会限制器件的功率处理能力。采用 3D 周期有限元模型对基于 X 切 LN/SiO₂/Si 结构 SH 声表面波(SH-SAW)谐振器进行了优化研究。研究表明, 当 SH-SAW 传播角 $\psi = -10^\circ \sim -20^\circ$ 、LN 和 SiO₂ 膜厚分别为 $h_{\text{LN}} = 0.1\lambda$ 和 $h_{\text{SiO}_2} = 0.2\lambda$ (λ 为叉指换能器周期)、铝电极金属化率 $\eta = 0.4$ 、电极相对厚度 $h_{\text{Al}}/\lambda = 5\% \sim 10\%$ 时, SH-SAW 谐振器的 k_{eff}^2 约为 30%, 且其 $TCF < -20 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$, 有望用于开发新一代的低温漂、超宽带 5G SAW 滤波器。

关键词: X 切铌酸锂薄膜; 水平剪切声表面波; 有效机电耦合系数; 频率温度系数; 声表面波谐振器; 超宽带声表面波滤波器

中图分类号: TN65; TN713 文献标识码: A

Design of Low Drift, Large Electromechanical Coupling SH-SAW Resonators Based on X-Cut LiNbO₃/SiO₂/Si

WEN Fujun^{1,2}, WANG Yuanyuan^{1,2}, QIAN Lirong^{1,2}, WANG Litian^{1,2},

LI Cuiping^{1,2}, XIONG Yang^{1,2}, TIAN Yahui³, LI Honglang⁴

(1. Tianjin Key Laboratory of Film Electronic & Communication Devices, School of Integrated Circuit Science and Engineering, Tianjin University of Technology, Tianjin 300384, China; 2. Engineering Research Center for Optoelectronic Devices and Communication Technology of Ministry of Education, Tianjin University of Technology, Tianjin 300384, China;

3. Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

4. National Center for Nanoscience and Technology, Beijing 100190, China)

Abstract: Owing to its high electromechanical coupling coefficient ($k_{\text{eff}}^2 > 30\%$), the horizontal shear (SH) acoustic modes in lithium niobate (LN) single-crystal films are typically investigated to develop thin-film acoustic resonators with large electromechanical coupling and ultra-wideband acoustic filters. However, its temperature coefficient of frequency (TCF) is extremely high ($> -50 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$). A high TCF not only reduces the effective bandwidth but also limits the power-management capability of the filters. Herein, we present an investigation into the optimization design of a low drift, large electromechanical coupling horizontal-shear surface acoustic wave (SH-SAW) resonator based on the X-cut LN/SiO₂/Si structure using a three-dimensional periodic finite-element model. Simulation results show that when the SH-SAW propagation angle ψ is between -10° and -20° , the film thicknesses of LN and SiO₂ are 0.1λ and 0.2λ (where λ is the period of the interdigital transducer) respectively, the metallization rate of the aluminum electrode (η) is 0.4, the relative thickness of the electrode is between 5% and 10%, the

收稿日期: 2024-03-25

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFB3606702); 广东省重点研发计划项目(2023B0101190002); 广州市重点研发计划项目(202206070001); 天津市技术创新引导专项(基金)企业科技特派员项目(23YDTPJC00600); 北京市科技新星计划项目(20220484172); 中国科学院青年创新促进会(2022024)

作者简介: 温福军(1998-), 男, 山西省人, 硕士生。通信作者: 钱莉荣(1983-), 男, 天津人, 讲师, 博士。李翠平(1981-), 女, 山东省人, 副教授, 博士。

k_{eff}^2 of the SH-SAW resonator remains at $\sim 30\%$, and the TCF is less than $-20 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$. Hence, the resonator is suitable for developing the next generation of low-temperature drift, ultra-wideband 5G SAW filters.

Key words: X-cut lithium niobate; SH-SAW; effective electromechanical coupling coefficient; temperature

0 引言

随着 5G 网络的普及,物联网和认知无线电等新兴无线通信技术发展迅猛,这不仅增加了对无线连接的需求,而且对射频(RF)滤波器的设计提出了新的挑战,需要更大的带宽来保证高速数据传输^[1-2]。基于声表面波(SAW)和声体波(BAW)谐振器的 RF 滤波器通常表现出有限的带宽,主要取决于选用的压电基片材料的机电耦合系数和声学模式^[1-5]。为了满足某些具有超过 10% 分数带宽(FBW)的大带宽设计,研究人员致力于开发具有大机电耦合系数的谐振器。

近年来随着薄膜转移技术的进步, LiNbO₃ (LN)单晶薄膜成为开发大机电耦合系数声学谐振器的热门材料^[1-11]。LN 单晶薄膜不仅具有较大的压电系数,且薄膜中的电场和声场可获得更好地限制,从而通过压电效应产生更强的相互作用^[5]。由于 LN 薄膜的各向异性,由其开发的声学谐振器的机电耦合系数强烈依赖于晶体取向、电场分布、声学模式和声波传播方向。在 LN 的压电系数中, e_{15} 和 e_{24} 压电常数最大 (3.69 C/m^2)^[12], 这意味着沿着 LN 的 X 晶轴或 Y 晶轴方向施加电场时,在其 XZ 平面或 YZ 平面内能产生最大的剪切形变。因此, Y 切 LN(Y-LN)和 X 切 LN(X-LN)中的水平剪切(SH)模式表现出较高的机电耦合系数($\sim 30\%$),常被用于开发具有大机电耦合系数的薄膜声学谐振器和宽带滤波器^[1-11]。

目前在 LN 薄膜声学谐振器研究中,人们主要关注的是对谐振器机电耦合系数 k_{eff}^2 和质量因子(Q 值)的优化和增强^[1,4,6-7,9-10],以及各种杂散模式的抑制^[2,8,11],而对谐振器频率温度系数(TCF)的关注较少。实际上, LN 薄膜中 SH 模式的 TCF 通常较高 ($> -50 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$)^[8],较高的 TCF 不仅会降低滤波器的可用有效带宽^[13],同时也会限制器件的功率处理能力,其原因是器件中耗散的功率转化成热量,进而引起器件的频移。

本文采用有限元法研究 X-LN/SiO₂/Si 结构中 SH 声表面波(SH-SAW)的频散特性,并实现低温漂($\text{TCF} < -20 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$)、大机电耦合系数($k_{\text{eff}}^2 > 20\%$)SH-SAW 谐振器的设计优化。与采用悬浮结构的 BAW 或 Lamb 波器件相比,基于 LN/SiO₂/Si

结构的 SAW 器件不仅制作工艺简单,且其散热性和功率耐受性也更好。此外, Si 衬底具有成本优势,且易与 CMOS 器件集成; SiO₂ 具有独特的正频率温度系数,可实现对谐振器 TCF 的调控。

1 传播角的影响

利用 COMSOL 软件建立 IDT/X-LN/SiO₂/Si 的三维(3D)周期模型,如图 1(a)所示。其中叉指换能器(IDT)为常用的铝(Al)电极,模型周期为 λ , LN、SiO₂ 和铝电极膜厚分别为 h_{LN} 、 h_{SiO_2} 和 h_{Al} 。由于 LN 的各向异性,需要对其设置旋转坐标系,以便将 LN 晶体坐标系下的材料参数转换到计算坐标系下,这种映射关系由欧拉角(φ, θ, ψ)描述^[14]。对于 X 切 LN,其欧拉角可设为 ($90^\circ, 90^\circ, \psi$),其中 ψ 为 SAW 传播角。图 1(b)为仿真的计算坐标系(x, y, z)与 LN 晶体坐标系(X, Y, Z)的关系示意图,其中 z 轴为 LN 基片的外法向方向,平行于 LN 的 X 晶轴; x 轴平行于 SAW 传播方向,与 LN 的 Y 晶轴间的夹角为 ψ ; y 轴平行于 IDT 的孔径方向。在模型的前后面(沿 y 轴方向)和左右面(沿 x 轴方向)两侧设置周期边界条件,同时设置 Si 衬底的厚度为 5λ ,并在其下面设置厚为 0.5λ 的 Si 完美匹配层(PML),以抑制因有限厚 Si 衬底而引起的伪体波反射。

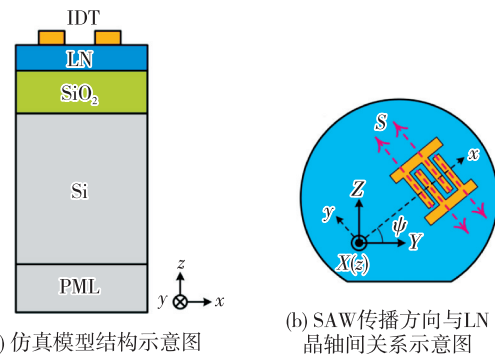


图 1 IDT/X-LN/SiO₂/Si 谐振器 3D 周期仿真模型示意图

图 2 是采用频域研究计算得到 $\psi = 0^\circ$ 时谐振器的导纳特性,其中周期 $\lambda = 2 \mu\text{m}$,电极金属化率 $\eta = 0.4$, $h_{\text{LN}} = 0.18\lambda$, $h_{\text{SiO}_2} = 0.13\lambda$ 和 $h_{\text{Al}} = 0.085\lambda$ 。由图可见,在频率 $1.0 \sim 3.5 \text{ GHz}$ 内,谐振器导纳在频率分别为 1.61 GHz 、 1.81 GHz 、 2.74 GHz 和 2.92 GHz 附近存在极值,分别对应于瑞利波(R-SAW)、水平剪切波(SH-SAW)、纵漏表面波(LLSAW)和高阶 SH 波模

式的谐振频率 f_r 。每种模式的导纳零点(即极小值)对应于该模式的反谐振频率 f_a 。由 f_r 和 f_a 可以计算得到该模式的声速 V_p 和有效机电耦合系数 k_{eff}^2 [1]:

$$k_{\text{eff}}^2 = \frac{\pi^2}{8} \cdot \frac{f_a^2 - f_r^2}{f_r^2} \quad (1)$$

$$V_p = \frac{(f_r + f_a) \cdot \lambda}{2} \quad (2)$$

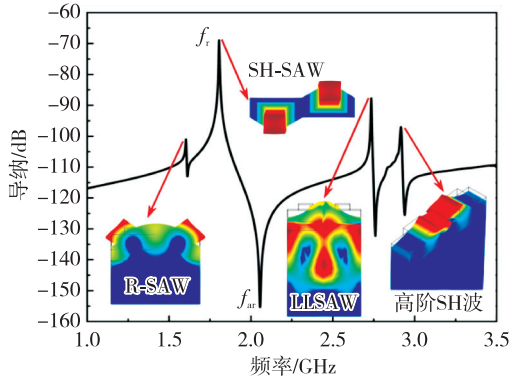
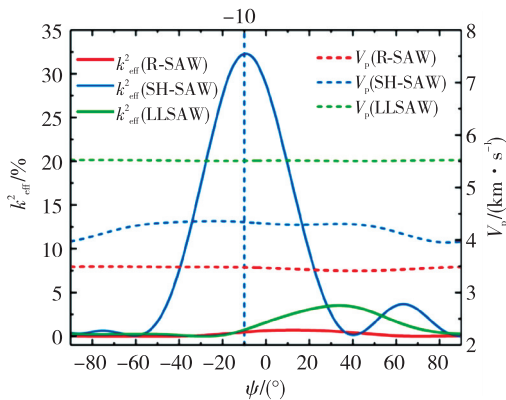
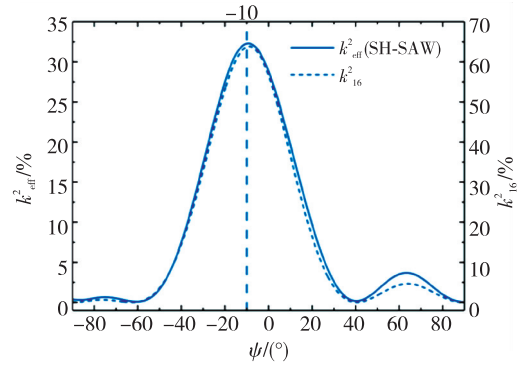


图2 IDT/XY-LN/SiO₂/Si 谐振器的导纳特性

R-SAW、SH-SAW 和 LLSAW 作为 3 种主要的表面波模式,针对传播角 ψ 对其声速 V_p 和有效机电耦合系数 k_{eff}^2 的影响进行了研究,结果如图 3(a)所示,由于对称性,图中仅给出了 ψ 在 $-90^\circ \sim 90^\circ$ 范围的变化。由图可见,传播角 ψ 在 $-40^\circ \sim 20^\circ$ 时可激励出较强的 SH-SAW,其 $k_{\text{eff}}^2 > 7\%$,且在 $\psi = -10^\circ$ 附近达到最大值 32.3%,其声速约为 4 300 m/s。传播角 ψ 在 $30^\circ \sim 50^\circ$ 时,LLSAW 成为谐振器中的主要模式,其 k_{eff}^2 在 $\psi = 35^\circ$ 附近达到最大值 3.6%,其声速约为 5 500 m/s,超过了 Si 衬底的慢剪切体波声速($\sim 5\ 235$ m/s),因而会向 Si 衬底中辐射体波能量(见图 2)。R-SAW 模式在 X 切 LN 中的激励较弱,当 ψ 在 $-90^\circ \sim 90^\circ$ 范围变化时,其 k_{eff}^2 不超过 0.7%,无法在 Y 切 LN 谐振器中成为较强的干扰模式[8]。



(a) IDT/X-LN/SiO₂/Si 谐振器中 3 种 SAW 模式 k_{eff}^2 和 V_p 随传播角 ψ 的变化特性



(b) SH-SAW 的有效机电耦合系数 k_{eff}^2 与 X-LN 的材料机电耦合系数 k_{16}^2 随传播角 ψ 变化特性比较

图3 传播角 ψ 对 SAW 各模式 k_{eff}^2 和 V_p 的影响

由于压电薄膜型 SAW 器件中的声学模式主要由 IDT 中的横向电场激励[5],故 SH-SAW 的有效机电耦合系数 k_{eff}^2 主要取决于 X-LN 本身的材料机电耦合系数 k_{16}^2 [5](见图 3(b)),其中:

$$k_{16}^2 = \frac{e_{16}^2}{\epsilon_{11} \cdot c_{11}} \quad (3)$$

式中 e_{16} 、 ϵ_{11} 和 c_{11} 分别为经过坐标变换后,在计算坐标系下 LN 相应的压电常数、介电常数和弹性常数。由图 3(b)可见, k_{eff}^2 与 k_{16}^2 的变化趋势相同,但数值有较大差异($k_{\text{eff}}^2 \approx k_{16}^2/2$),其原因是:

1) 谐振器的有效机电耦合系数 k_{eff}^2 是动态耦合系数,其大小不仅与材料本身的静态耦合系数 k_{16}^2 有关,而且受到电场分布和电极结构的影响。通常 k_{eff}^2 小于压电材料的静态机电耦合系数,因为并非所有的弹性能量都是电耦合[15]。

2) 图 3(b)中 k_{16}^2 为 X-LN 的静态机电耦合系数,而非谐振器所用的 X-LN/SiO₂/Si 复合基片的静态耦合系数。实际上,X-LN/SiO₂/Si 的静态耦合系数不仅与 X-LN、SiO₂ 和 Si 衬底的相关材料参数有关,且受 X-LN 和 SiO₂ 膜厚的影响。

2 膜厚优化

为了优化设计基于 X-LN/SiO₂/Si 低温漂、大机电耦合的 SH-SAW 谐振器,研究了当传播角 $\psi = -10^\circ$ 时, h_{LN} 和 h_{SiO_2} 对 SH-SAW 的 k_{eff}^2 、 V_p 和频率温度系数(TCF)的影响,其计算结果如图 4 所示。为了尽可能减少 IDT 电极的影响,计算中铝电极的相对厚度 h_{Al}/λ 设为 0.1,金属化率(η)为 0.5,故电极质量负载的影响可以忽略。由此可得:

$$\text{TCF} = \frac{1}{T - 25^\circ\text{C}} \cdot \frac{f_r(T) - f_r(25^\circ\text{C})}{f_r(25^\circ\text{C})} \quad (4)$$

式中: $f_r(T)$ 为温度 T 下谐振器的谐振频率; $f_r(25^\circ\text{C})$

为室温 25 °C 时谐振器的谐振频率。

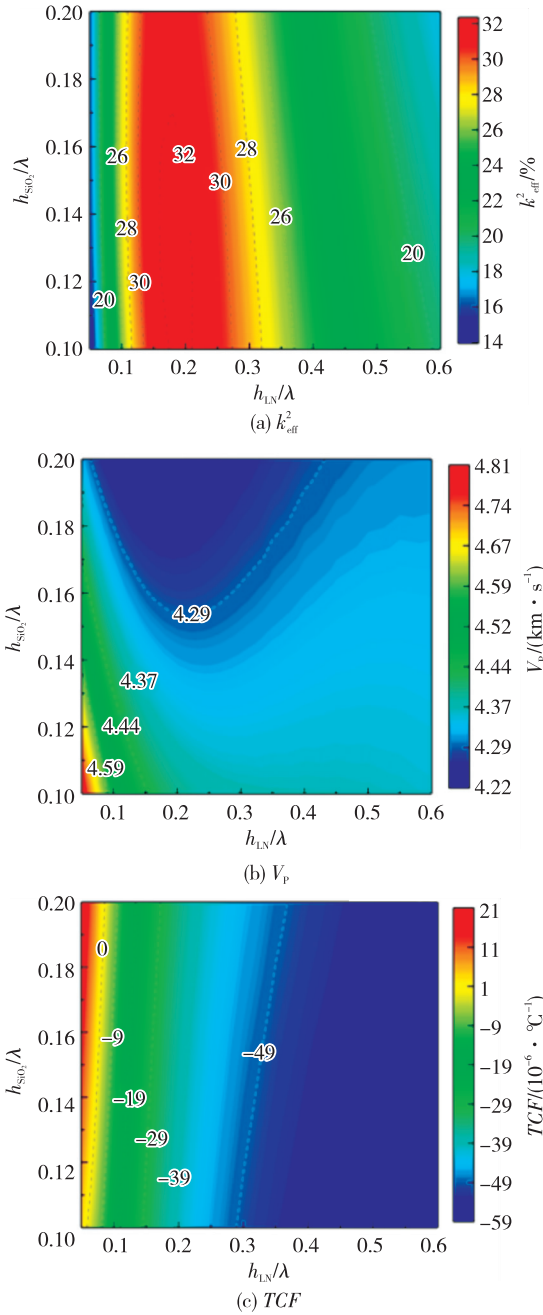


图 4 IDT/X(-10°)Y-LN/SiO₂/Si 谐振器中 SH-SAW 模式声学特性随 LN 和 SiO₂ 膜厚变化的二维等值线图

由图 4(a) 可见, LN 膜厚对谐振器的有效机电耦合系数 k_{eff}^2 影响最显著, 当 h_{LN} 取 $0.15\lambda \sim 0.25\lambda$ 时, 无论 SiO₂ 膜厚 h_{SiO_2} 在 $0.1\lambda \sim 0.2\lambda$ 间如何变化, 其 k_{eff}^2 都高达 $\sim 30\%$ 。

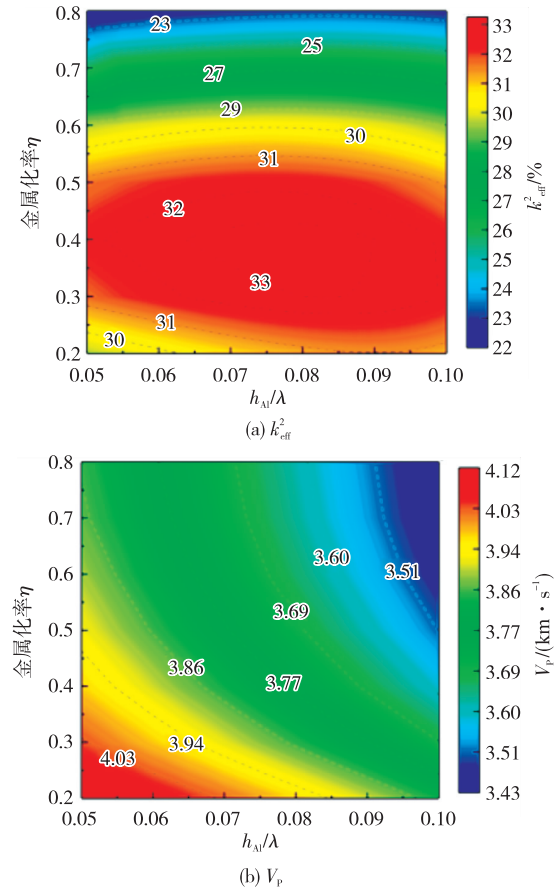
由图 4(b) 可见, LN 膜厚和 SiO₂ 膜厚均对 SH-SAW 声速 V_p 的影响显著, V_p 随两者厚度的增大而减小。这是因为随着 LN 和 SiO₂ 膜厚的增加, SH-SAW 的声能主要集中于低声速的 LN 与 SiO₂ 层,

而高声速 Si 衬底的影响将逐渐减弱。

由图 4(c) 可见, 当 SiO₂ 膜厚 h_{SiO_2} 在 $0.1\lambda \sim 0.2\lambda$ 间变化, LN 膜厚 h_{LN} 约为 0.1λ 时, 谐振器的 $TCF \approx -10 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$, 且随着 SiO₂ 膜厚的增加而减小, 这是由于 SiO₂ 的温度补偿作用。

3 电极优化

图 5 是当 $h_{\text{LN}} = 0.1\lambda$ 和 $h_{\text{SiO}_2} = 0.2\lambda$ 时, Al 电极金属化率 η 和相对厚度 h_{Al}/λ 对 X(-10°)Y-LN/SiO₂/Si 谐振器中 SH-SAW 的 k_{eff}^2 、声速 V_p 和频率温度系数(TCF)的影响。由图 5(a) 可见, SH-SAW 的 k_{eff}^2 受电极金属化率 η 的影响较大, k_{eff}^2 随着 η 的减小有增强的趋势, 这可能是因为适当减小 IDT 的金属化率 η 可以增强其水平电场分量, 从而有助于提高 k_{eff}^2 。特别地, 当 $\eta = 0.4$, 铝电极厚度 h_{Al}/λ 在 $5\% \sim 10\%$ 变化时, k_{eff}^2 都超过了 30% 。由图 5(b) 可见, SH-SAW 的声速 V_p 随着电极金属化率 η 和相对厚度 h_{Al}/λ 的增大而减小, 而图 5(c) 则表明 SH-SAW 的 TCF 会随着 η 和 h_{Al}/λ 的增大而增大。当 $\eta = 0.4$, 铝电极厚度 h_{Al}/λ 在 $5\% \sim 10\%$ 变化时, V_p 约为 $3.9 \sim 3.6 \text{ km/s}$, $TCF \approx (-12 \sim -18) \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ 。



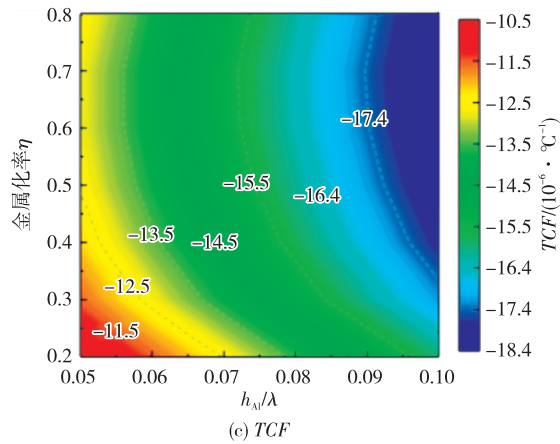


图5 IDT/X(-10°)Y-LN/SiO₂/Si 谐振器中 SH-SAW 模式声学特性随 Al 电极金属化率 η 和相对厚度 h_{Al}/λ 变化的二维等值线图

4 R-SAW 与 LLSAW 模式的抑制

基于 X(-10°)Y-LN/SiO₂/Si 复合基片,经过膜厚与电极优化,最终选择 LN 和 SiO₂ 膜厚分别为 $h_{\text{LN}}=0.1\lambda$ 和 $h_{\text{SiO}_2}=0.2\lambda$,Al 电极金属化率 $\eta=0.4$,电极膜厚 $h_{\text{Al}}/\lambda=6\%$,IDT 周期 $\lambda=2\mu\text{m}$ 。采用 3D 周期模型仿真得到 IDT/X-LN/SiO₂/Si 谐振器的导纳特性如图 6 中红色实线所示。由图可见,谐振器除了在频率 1.84 GHz 附近存在 SH-SAW 主模式外,在 1.69 GHz、2.67 GHz 和 2.93 GHz 频率附近还存在 R-SAW、LLSAW 和高阶 SH 波模式,其中 LLSAW 模式耦合较强,虽然 R-SAW 耦合较弱,但其距 SH-SAW 的谐振频率较近。这两种模式有可能成为影响滤波器性能的干扰模式,所以有必要考虑对其进行一定的抑制。

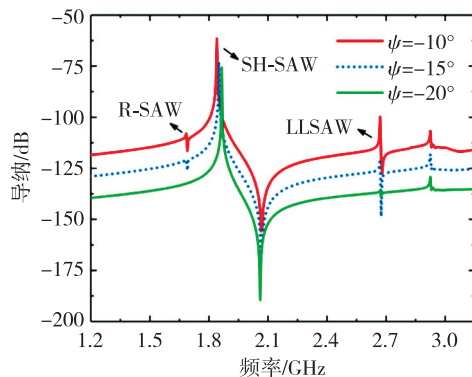


图6 不同传播角 ψ 下 IDT/X-LN/SiO₂/Si 谐振器的导纳特性

由图 3(a)可知,当传播角 ψ 转到 -20°附近时,R-SAW 和 LLSAW 模式的耦合系数都接近于 0,所以可以采用改变传播角的方法来抑制这两种模式。在其他优化参数不变的条件下,图 6 给出了传播角

$\psi=-15^\circ$ 和 -20° 的导纳特性。由图 6 可见,R-SAW 和 LLSAW 模式得到了很好地抑制,特别是 $\psi=-20^\circ$ 时,这两种模式几乎被完全抑制掉,但其代价是 SH-SAW 的 k_{eff}^2 也有所减小。表 1 为 SH-SAW 在 -10° 、 -15° 和 -20° 传播角下的 V_p 、 k_{eff}^2 和 TCF 的参数对比,其 LN 膜厚、SiO₂ 膜厚、Al 电极金属化率和厚度均为 $h_{\text{LN}}=0.1\lambda$ 、 $h_{\text{SiO}_2}=0.2\lambda$ 、 $\eta=0.4$ 、 $h_{\text{Al}}/\lambda=6\%$,IDT 周期 $\lambda=2\mu\text{m}$ 。

表 1 IDT/X-LN/SiO₂/Si 谐振器在不同传播角 ψ 下 SH-SAW 的 V_p 、 k_{eff}^2 和 TCF

$\psi/(\circ)$	$V_p/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	$k_{\text{eff}}^2/\%$	$\text{TCF}/(10^{-6} \cdot \text{C}^{-1})$
-10	3 905	32	-13
-15	3 915	31	-12
-20	3 925	27	-11

5 结束语

本文采用 3D 周期有限元模型研究了传播角 ψ 、LN 和 SiO₂ 膜厚(h_{LN} 、 h_{SiO_2})、Al 电极金属化率(η)及膜厚(h_{Al})对 IDT/X-LN/SiO₂/Si 谐振器中 SH-SAW 的声速 V_p 、有效机电耦合系数 k_{eff}^2 和 TCF 的影响,并给出了实现低温漂($<-20 \times 10^{-6}/\text{C}$)、大机电耦合($\sim 30\%$)SH-SAW 谐振器的优化参数。同时,通过适当改变传播角 ψ 可以更好地抑制谐振器中的 R-SAW 和 LLSAW 模式。研究结果可作为开发新一代的低温漂、超宽带 5G SAW 滤波器的重要参考。

参考文献:

- [1] HSU T H, TSENG K J, LI M H. Thin-film lithium niobate-on-insulator (LNOI) shear horizontal surface acoustic wave resonators[J]. Journal of Micromechanics and Microengineering, 2021, 31(5): 054003.
- [2] HSU T H, TSAI C H, TUNG S S, et al. Miniature LiNbO₃/SiO₂/Si SH-SAW resonators with near-spurious-free response[J]. IEEE Electron Device Letters, 2023, 44(7): 1200-1203.
- [3] LIU Y, CAI Y, ZHANG Y, et al. Materials, design, and characteristics of bulk acoustic wave resonator: A review[J]. Micromachines, 2020, 11(7): 630.
- [4] BOUSQUET M, PERREAU P, MAEDER-PA-CHURKA C, et al. Lithium niobate film bulk acoustic wave resonator for sub-6 GHz filters[C]//[S. l.]:2020 IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS),

- IEEE, 2020: 1-4.
- [5] LU R, GONG S. RF acoustic microsystems based on suspended lithium niobate thin films: Advances and outlook[J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2021, 31(11): 114001.
- [6] HSU T H, TSENG K J, LI M H. Large coupling acoustic wave resonators based on $\text{LiNbO}_3/\text{SiO}_2/\text{Si}$ functional substrate[J]. *IEEE Electron Device Letters*, 2020, 41(12): 1825-1828.
- [7] ZHOU H, ZHANG S, WU J, et al. Ultrawide-band SAW devices using SH0 mode wave with increased velocity for 5G front-ends[C]//[S. l.]:2021 IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS), IEEE, 2021: 1-4.
- [8] XU H, FU S, SHEN J, et al. Large-range spurious mode elimination for wideband SAW filters on $\text{LiNbO}_3/\text{SiO}_2/\text{Si}$ platform by LiNbO_3 cut angle modulation[J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 2022, 69 (11): 3117-3125.
- [9] WU J, ZHANG S, ZHENG P, et al. Ultra-wideband MEMS filters using localized thinned 128°Y -cut thin-film lithium niobate[C]//[S. l.]:2023 IEEE 36th International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS), IEEE, 2023: 177-180.
- [10] GUO Y, KADOTA M, TANAKA S. Serially connected strip-type acoustic wave resonator using $X\text{-}40^\circ\text{Y}$ LiNbO_3 (XSAR)—feasibility study using macro model [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2024, 63 (2): 02SP44.
- [11] TU C, ZHANG T, ZHANG Z, et al. Investigation on spurious mode suppression in 3.8-GHz SH-mode SAW resonators based on $\text{LiNbO}_3/\text{SiO}_2/\text{Si}$ multilayer structure[J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2024, 34(4): 045007.
- [12] KOVACS G, ANHORN M, ENGAN H E, et al. Improved material constants for LiNbO_3 and LiTaO_3 [C]//[S. l.]: IEEE Symposium on Ultrasonics, IEEE, 1990: 435-438.
- [13] YANTCHEV V, TURNER P J, MCHUGH S, et al. Parametric study of resonant TC-SAW piston-mode configurations[C]//[S. l.]:2017 IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS), IEEE, 2017: 1-4.
- [14] MORGAN D. *Surface acoustic wave filters: With applications to electronic communications and signal processing*[M]. 2th ed. Oxford: Academic Press, 2010.
- [15] LAMBERTI N, IULA A, PAPPALARDO M. The electromechanical coupling factor in static and dynamic conditions[J]. *Acta Acustica United with Acustica*, 1999, 85(1): 39-46.