

双电极叉指换能器声表面波低温传感器的设计与仿真分析

叶梦莹, 崔永俊, 王红亮

(中北大学 省部共建动态测试技术国家重点实验室, 山西 太原 030051)

摘要:为了应对低温环境下的温度测试需求,设计了一种具有双电极叉指换能器(IDT)的 $128^\circ\text{YX-LiNbO}_3$ 延迟线型声表面波(SAW)温度传感器。利用COMSOL软件搭建了温度传感器模型,确定了传感器的最佳模型参数,并在 $-196\sim 100^\circ\text{C}$ 对传感器进行仿真测试。结果表明,采用双电极叉指结构的传感器的机电耦合系数达到5.35%,同时传感器的谐振频率与温度呈现出良好的线性关系,温度灵敏度为 $26.2\text{ kHz}/^\circ\text{C}$,频率温度系数达到 $-83.4\times 10^{-6}/^\circ\text{C}$,证明了 LiNbO_3 在低温环境下的可靠性。

关键词:声表面波;温度传感器;低温;双电极叉指换能器;有限元

中图分类号:TP212;TN65;TN912 **文献标识码:**A

Design and Simulation Analysis of Surface Acoustic Wave Cryogenic Sensors with Double-Electrode Interdigitated Transducer

YE Mengying, CUI Yongjun, WANG Hongliang

(State Key Laboratory of Dynamic Testing Technology, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: A 128°YX -cut lithium niobate (LiNbO_3) delay-line-type surface acoustic wave (SAW) temperature sensor with a dual-electrode interdigitated transducer (IDT) was designed to meet the demand for temperature measurements in low-temperature, harsh environments. A temperature-sensor model was built using COMSOL software, and the optimal model parameters were determined. The sensor was tested within a temperature range of -196°C to 100°C . According to the simulation results, the electromechanical coupling coefficient of the sensor with the dual-electrode finger structure was 5.35%. Moreover, the sensor's resonance frequency exhibits a strong linear relationship with temperature, with a temperature sensitivity of $26.2\text{ kHz}/^\circ\text{C}$ and a frequency temperature coefficient of $-83.4\times 10^{-6}/^\circ\text{C}$, demonstrating the reliability of LiNbO_3 in low-temperature environments.

Key words: surface acoustic waves; temperature sensor; cryogenic; double electrode interdigital transducer; finite element

0 引言

声表面波(SAW)技术因具有低成本、小尺寸、高灵敏度、快速响应以及能在恶劣环境中操作等特性,被广泛应用于日常生活中^[1-5]。随着地球极地探测、深空探测和生命科学等领域的发展,对低温测量的需求也日益增加^[6]。由于SAW技术具有抗干扰性、可设计自供电或无线传感的优势,在低温环境下的应用备受关注^[7-8]。随着SAW技术日益成熟,SAW温度传感器成为极端环境下精确测量温度的最佳选择。目前,基于SAW温度传感器的研

究主要采用 AlN 、 ZnO 等具有强压电效应的高质量晶体薄膜作为压电衬底,但在射频和低温环境下,由于二能级系统的存在,这些材料会出现较大的损耗^[9]。铌酸锂(LiNbO_3)作为最常用的压电材料之一,具有负的频率温度系数,其中 $128^\circ\text{YX-LiNbO}_3$ 具有高机电耦合系数、高相速度和纯Rayleigh模式,适用于制作SAW温度传感器^[10-11]。

为了提高器件的性能并验证其在低温环境下的表现,设计了一种具有双电极换能器的 $128^\circ\text{YX-LiNbO}_3$ 双端口延迟线型SAW低温传感器。通过

收稿日期:2024-07-30

基金项目:山西省基础研究计划项目(20210302123034)

作者简介:叶梦莹(2000-),女,山西省运城市人,硕士生。通信作者:崔永俊(1973-),男,博士,教授。

3D有限元仿真模型,对比分析了单电极 IDT 和双电极 IDT 两种换能器结构对所激发声波的损耗情况。采用瞬态分析方法对双电极换能器的输入、输出信号进行分析,并在 $-196 \sim 100\text{ }^\circ\text{C}$ 进行低温仿真,仿真结果表明, LiNbO_3 材料在低温环境下具有优异的性能。

1 SAW 温度传感器工作原理

SAW 温度传感器基于压电效应工作。当电信号传输到输入 IDT 端时,压电衬底发生逆压电效应,将电信号转换为声表面波信号。声表面波沿着衬底表面传播,到达输出 IDT 后通过压电效应将声表面波信号转换为电信号输出,实现了“电-声-电”的转换^[12]。当温度发生改变时,声表面波的相速度也随之改变,其传播速度与温度 T 的关系可表示为

$$\Delta v = v_0 \times TCF (T_{\text{ref}} - T) \quad (1)$$

式中: Δv 是速度变化量; v_0 是参考温度 T_{ref} 下的 SAW 速度; TCF 是频率温度系数。

双电极叉指换能器是在单电极的基础上增加了一个栅极结构。相较于单电极配置,双电极配置能够有效抑制反射效应,如图 1(b)所示,电极 1 和电极 2 的反射会被来自电极 3 和电极 4 的反射抵消。Ralib 等^[13]对单电极 IDT 和双电极 IDT 进行对比,结果表明,双电极结构可以有效降低回波损耗,抑制不必要的声反射,提高传感器性能。

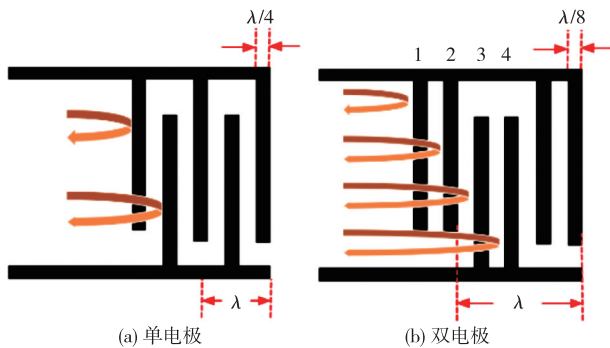


图 1 SAW 在单电极和双电极的内反射

2 SAW 温度传感器结构设计

2.1 模型建立

将 SAW 低温传感器的电极宽度 a 设置为 $1.5\text{ }\mu\text{m}$, 波长 λ 为 $12\text{ }\mu\text{m}$ 。借助有限元软件 COMSOL Multiphysics 6.1,建立了以 $128^\circ\text{YX-LiNbO}_3$ 为衬底、Al 为电极的三维单端对双电极 IDT 有限元模型,如图 2 所示。模型的 LiNbO_3 衬底厚度固定在 5λ , 底部添加了 1λ 的完美匹配层以缩小模型尺寸并避

免来自底部边界反射回波的干扰。分别在模型的前后、两侧添加周期性边界条件以模拟无限周期重复的 SAW 传感器。同时,在前两个 Al 电极上施加 1 V 的终端电压,另外两个电极接地。相速度 V_p 、机电耦合系数 K^2 和频率温度系数 TCF ^[14-15] 为

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

$$K^2 = \frac{\pi f_r}{2 f_a} / \tan\left(\frac{\pi f_r}{2 f_a}\right) \quad (3)$$

$$TCF = \frac{1}{f_r} \cdot \frac{\Delta f_r}{\Delta T} \quad (4)$$

式中: f_r 为谐振频率; f_a 为反谐振频率; ΔT 和 Δf_r 分别表示温度和频率的变化值。

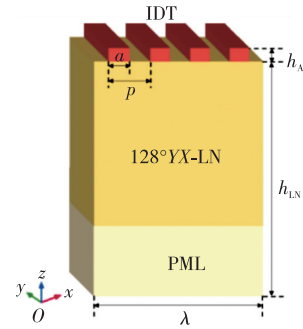


图 2 双电极 IDT 周期性结构示意图

图 3 为双电极 IDT 结构的模态位移与导纳。由图 3(a)可看出, $128^\circ\text{YX-LiNbO}_3$ 激发的是 Rayleigh 波,且质点的振动位移表明声波的能量集中在压电衬底表面。由图 3(b)可知谐振频率 f_r 和反谐振频率 f_a 分别为 313.6 MHz 、 319.8 MHz ,将其代入式(2),计算得到双电极 IDT 结构的相速度为 $3\,800.4\text{ m/s}$ 。为了验证双电极结构是否能抑制声波的反射,对单电极 IDT 结构进行了模态分析,结果如图 4 所示。通过对振型位移的对比可见,双电极 IDT 的位移比单电极 IDT 更剧烈,证明双电极 IDT 可有效抑制声波的反射。

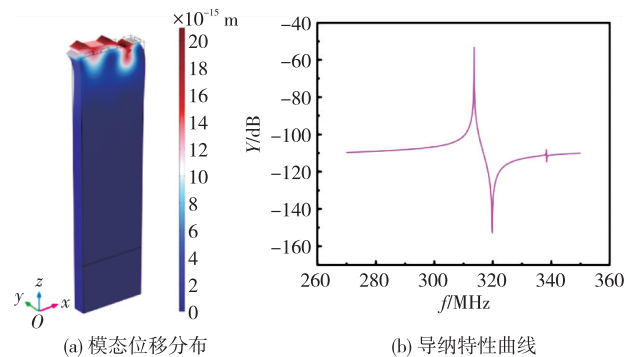


图 3 双电极 IDT 仿真结果

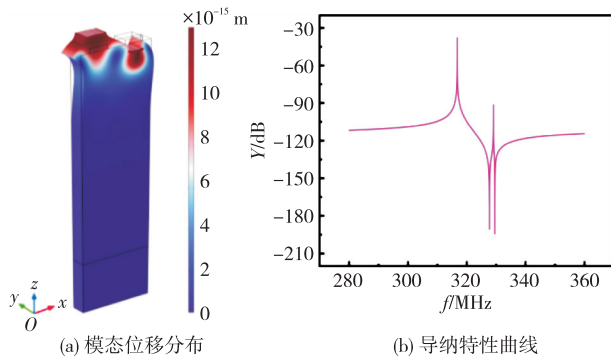


图 4 单电极 IDT 仿真结果

2.2 结构优化

2.2.1 电极厚度优化

当压电衬底表面覆盖上叉指电极时,会引起电极的质量负载效应。仿真中,质量负载效应体现在电极厚度变化对导纳的影响。为了研究叉指电极厚度对 SAW 传播特性的影响,对电极膜厚比(h_{Al}/λ)进行参数化扫描,分析电极厚度与导纳、相速度 V_p 和机电耦合系数 K^2 之间的关系。图 5 显示了 h_{Al}/λ 从 0.01 到 0.1 的导纳变化。

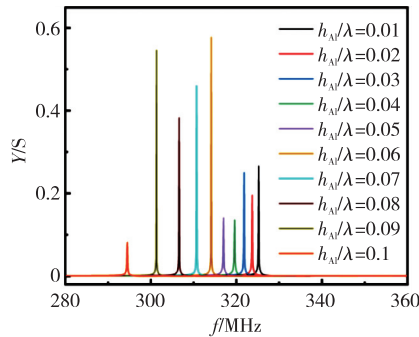


图 5 不同电极膜厚比导纳曲线

由图 5 可看出,当 $h_{Al}/\lambda = 0.06$ 时,SAW 传感器的导纳达到最大值,即此时传感器的阻抗和插入损耗最小。图 6 为双电极结构与单电极结构下 h_{Al}/λ 对 V_p 、 K^2 的影响。

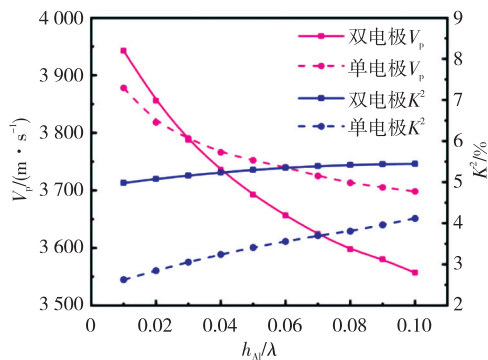


图 6 两种电极结构的不同电极膜厚比下 V_p 、 K^2 曲线

由图 6 可看出,双电极结构可有效降低 V_p 并提高 K^2 ,且随着 h_{Al}/λ 的增加, V_p 逐渐减小而 K^2 逐渐增大,最终趋于稳定。当 $h_{Al}/\lambda = 0.06$ 时,双电极结构下的 V_p 为 3 656.4 m/s、 K^2 为 5.35%,相较于单电极均有一定改善,进一步验证了双电极 IDT 结构在优化 SAW 传感器性能方面的潜力。

2.2.2 孔径优化

为了获得更高性能的声表面波传感器,采用 3D 周期性条形有限元仿真模型(见图 7)分析器件孔径 W 对器件性能的影响。对孔径进行参数化扫描,步长为 10λ ,从 40λ 增加到 80λ ,得到不同孔径下的导纳曲线如图 8 所示。由图 8 可看出,导纳值随着孔径的增加而增大,即孔径越大,损耗越小,性能越高。然而,孔径的增加使器件体积增大,提高了实际工艺制造难度,同时加剧了声波的反射,进而产生杂波。因此,选择孔径宽度为 80λ 可保证器件性能并控制其体积和制造难度。

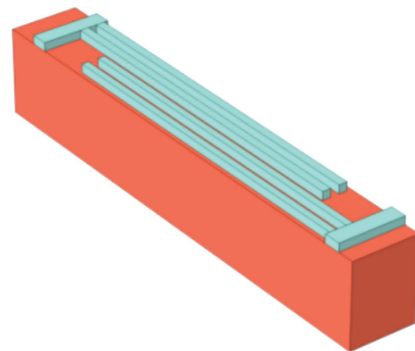


图 7 3D 周期条形有限元模型

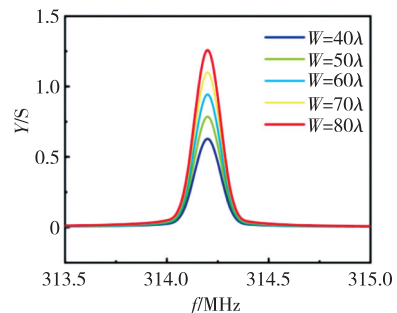


图 8 不同孔径下的导纳曲线

2.2.3 叉指对数优化

叉指电极对数 N_p 也是影响传感器性能的主要因素之一。建立双电极 IDT 二维完整结构模型,如图 9 所示,研究了当 Al 电极厚度为 720 nm、孔径为 80λ 时,叉指电极对数的变化与器件插入损耗之间的关系。

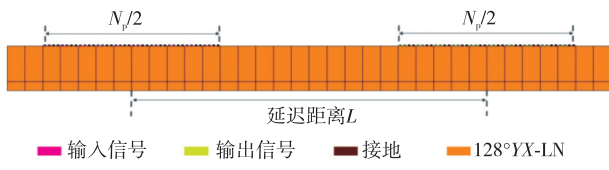
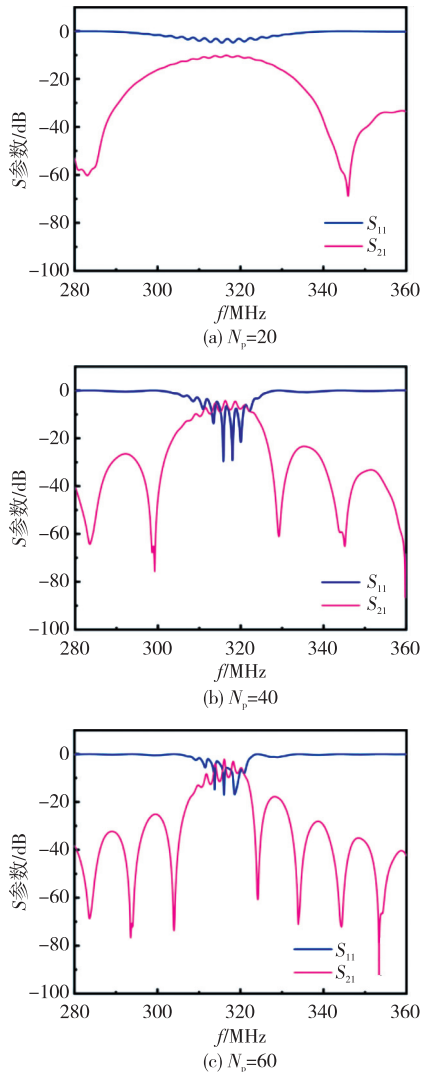
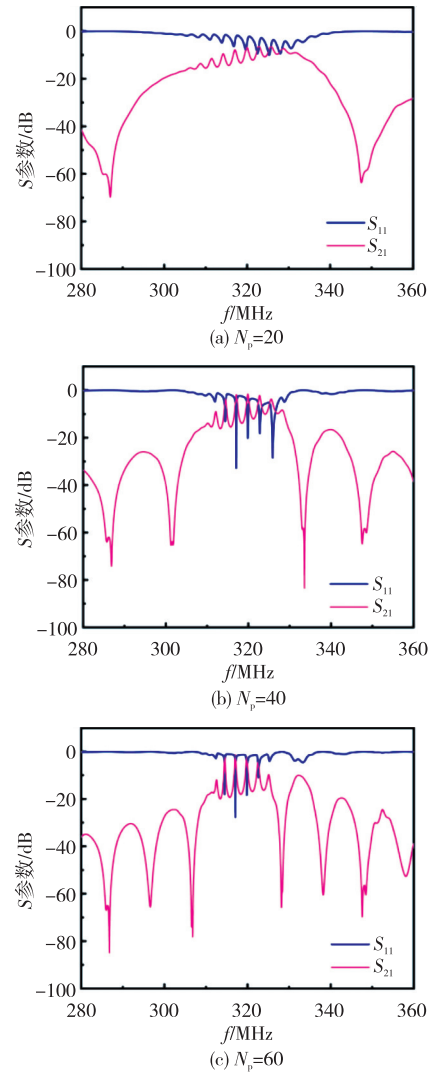


图9 双电极 IDT 二维完整结构示意图

图 10 为双电极 IDT 在不同叉指对数下的 S 参数。其中 S_{11} 反映的是回波损耗, S_{11} 越小则回波损耗越大, 器件内部的信号损失越小, 意味着器件具有更高的品质因数。 S_{21} 反映的是插入损耗, S_{21} 越大则插入损耗越小, 意味着器件性能越好^[16]。由图可见, 叉指电极对数越多, 带宽越小, 插入损耗减小。但谐振频率 f_0 处会出现频率波动, 这种现象主要由边缘反射造成, 叉指电极对数越多, 谐振频率附近的波动越剧烈。

图 10 双电极 IDT 不同叉指对数下的 S 参数
为了验证具有双电极 IDT 的 SAW 传感器是否

能够有效降低损耗, 对不同叉指电极对数的单电极 IDT 结构进行了相应的仿真, 如图 11 所示。对比图 10、11 可见, 双电极 IDT 不仅可以有效抑制反射, 减小谐振处的波动, 同时也可以减少插入损耗。这是因为双电极 IDT 能够增强电信号与声信号之间的耦合作用, 对杂散模式起到抑制作用, 提高 SAW 传感器机电耦合系数。且双电极 IDT 可以实现更好的阻抗匹配, 减少信号反射, 降低能量在转换过程中的损耗, 从而减少插入损耗^[17]。

图 11 单电极 IDT 不同叉指对数下的 S 参数

为了使器件的性能最优且满足小型化的要求, 设置 IDT 对数为 40。此研究结果有望为 SAW 传感器的设计和制造提供重要参考。

2.2.4 延迟距离优化

对于延迟线型 SAW 传感器, 两个 IDT 之间的距离对器件的灵敏度、信号衰减、响应时间等均有

一定影响。保持其他参数不变, 设定电极对数为 40, 仿真模拟不同延迟距离对器件性能的影响, 结果如图 12 所示。由图可看出, 当延迟距离减小时, S_{21} 增大 (即插入损耗减小), S_{11} 减小 (即器件内部的信号损失减小)。故延迟距离为 40λ 时, 器件性能最好。

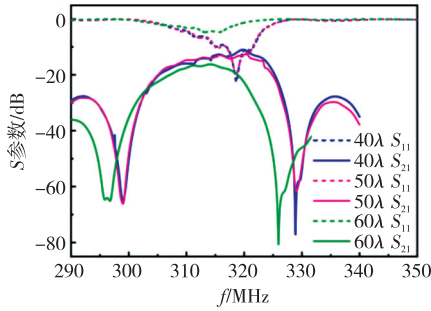


图 12 不同延迟距离下的 S 参数

2.2.5 瞬态响应分析

为了深入分析双电极结构 SAW 传感器的传输性能, 建立 2D 完整结构对其进行时域分析, 其中延迟线距离 L 设为 40λ 。输入激励信号设置为正弦信号 $U_{in} = 10 \sin(2\pi t/T_0)$, 其中 T_0 为谐振周期, 瞬态步长为 $T_0/8$, 时间响应为 180 ns。图 13 为 IDT 上输入和输出电压随时间的变化。由图可见, 在给定输入信号 U_{in} 约 100 ns 后, 输出端 IDT 接收到平均幅值为 3 V 的输出电压 U_{out} 。图 14 为输出端 IDT 在 x 、 y 方向上位移分量的变化, 其中 y 向分量大于 x 向分量, 即激发出的声波是 Rayleigh 波, 证明了仿真结果的可靠性。

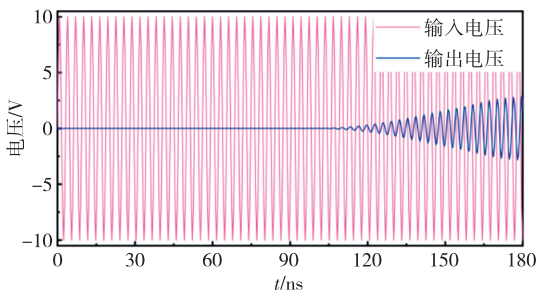


图 13 双电极 IDT 输入、输出电压信号随时间的变化

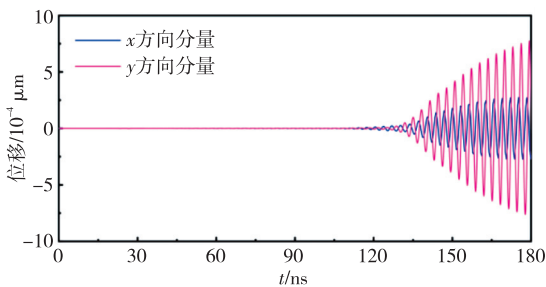


图 14 双电极 IDT 输出端位移瞬态响应

根据上述有限元模拟仿真结果, 得出优化后的具有双电极叉指换能器延迟线型 SAW 传感器的设计方案, 具体参数如表 1 所示。

表 1 SAW 传感器结构参数

参数	数值
谐振频率/MHz	313.6
SAW 波长/ μm	12
IDT 指宽/ μm	1.5
电极厚度/nm	720
孔径/ μm	960
叉指电极对数/对	40
延迟距离/ μm	480

3 SAW 温度传感器温度仿真

采用优化后的器件结构参数, 在低温环境下对 SAW 传感器的频率温度特性进行仿真。为贴合实际情况, 考虑了 LiNbO_3 衬底和 Al 电极的热膨胀系数以及材料特性的温度系数^[18], 如表 2 所示。在仿真过程中设定温度扫频以模拟不同温度下传感器的谐振频率, 其中, 温度范围从 $-196\text{ }^\circ\text{C}$ 增至 $100\text{ }^\circ\text{C}$, 步长为 $50\text{ }^\circ\text{C}$ 。

表 2 材料常数与温度系数

		材料常数	
		LiNbO_3	Al
热膨胀系数/ $10^{-6}\text{ }^\circ\text{C}^{-1}$	α_{11}	15.4	23
	α_{33}	7.5	23
弹性常数 /GPa	c_{11}	203	111
	c_{12}	53	61
	c_{13}	75	61
	c_{14}	8.9	111
	c_{33}	243	—
	c_{44}	60	25
弹性矩阵温度系数/ $10^{-4}\text{ }^\circ\text{C}^{-1}$	T_{c11}	-1.74	—
	T_{c12}	-2.52	—
	T_{c13}	-1.59	—
	T_{c14}	-2.14	—
	T_{c33}	-1.53	—
	T_{c44}	-2.04	—

续表			
	材料常数		
		LiNbO ₃	Al
压电常数/(C·m ⁻²)	e_{15}	3.7	—
	e_{31}	-2.5	—
	e_{33}	1.3	—
介电常数/ (10 ⁻¹¹ F·m ⁻¹)	ϵ_{11}	43.6	—
	ϵ_{33}	29.2	—

图 15 为双电极叉指在不同温度下的 S_{21} 参数分布。由图可看出,随着温度逐渐升高, S_{21} 参数逐渐减小且 SAW 温度传感器的谐振频率逐渐降低,这表明声表面波的传播损耗逐渐增大。由图 16 可见,传感器的谐振频率随温度升高呈下降趋势,且表现出良好的线性关系,由式(4)可得双电极叉指换能器的 TCF 为 $-83.39 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 。从 -196°C 到 100°C ,温度灵敏度为 $26.2 \text{ kHz}/^{\circ}\text{C}$,表明 LiNbO₃ 可作为低温精密测量的高性能替代材料。

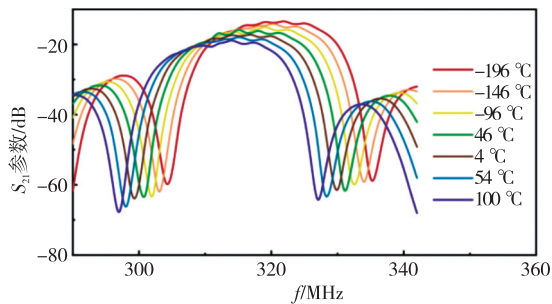


图 15 不同温度下 S_{21} 分布

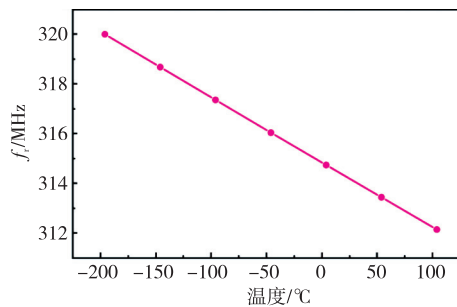


图 16 传感器谐振频率随温度的变化

4 结束语

采用有限元模拟仿真方法,深入探究了具有双电极叉指换能器的 $128^{\circ}\text{YX-LiNbO}_3$ 延迟线型声表面波低温传感器。结果表明,通过引入双电极叉指结构可将 K^2 提高到 5.35% ,同时通过对器件结构参数(主要包括电极厚度、叉指换能器对数和孔径)的优化,进一步提升了 SAW 低温传感器的性能。

在温度 $-196 \sim 100^{\circ}\text{C}$ 内对该传感器进行仿真测试。仿真结果表明,传感器的谐振频率随温度升高呈下降趋势,表现出良好的线性关系,温度灵敏度高达 $26.2 \text{ kHz}/^{\circ}\text{C}$, TCF 达到 $-83.4 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$,充分证明了 $128^{\circ}\text{YX-LiNbO}_3$ 有望成为用于低温环境下精密测量的一种具有潜在价值的高性能材料。

参考文献:

- [1] ZHANG H, WANG H. Investigation of surface acoustic wave propagation characteristics in new multilayer structure: SiO₂/IDT/LiNbO₃/diamond/Si[J]. *Micromachines*, 2021, 12(11):1286.
- [2] LI Q, LIU J, YANG B, et al. Highly sensitive surface acoustic wave flexible strain sensor[J]. *IEEE Electron Device Letters*, 2019, 40(6):961-964.
- [3] YANG Y, DEJOURS C, HALLIL H. Trends and applications of surface and bulk acoustic wave devices: a review[J]. *Micromachines*, 2023, 14(1):43.
- [4] IWAYA T, AKAO S, YAMANAKA K, et al. Development of ball surface acoustic wave gas chromatograph for environmental monitoring in spacecraft and its application on the ground[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2022, 61(SG):SG1051.
- [5] MANDAL D, BANERJEE S. Surface acoustic wave (SAW) sensors: physics, materials, and applications [J]. *Sensors (Basel)*, 2022, 22(3):820.
- [6] NIU S, CHANG X, ZHU Z, et al. Low-temperature wearable strain sensor based on a silver nanowires/graphene composite with a near-zero temperature coefficient of resistance[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2021, 13(46):55307-55318.
- [7] YAN Y, WANG Y, CARKA D, et al. Surface acoustic wave sensors for temperature and strain measurements[C]//Las Vegas, NV, USA:2020 IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS), IEEE, 2020: 1-5.
- [8] NICOLIOIU A, STAN G E, NASTASE C, et al. The behavior of gold metallized AlN/Si- and AlN/glass-based SAW structures as temperature sensors[J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 2021, 68(5):1938-1948.
- [9] SUI W, ZHENG X Q, LIN J T, et al. Thermal response and TCF of GaN/AlN heterostructure multimode micro string resonators from -10°C up to 325°C [J]. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2021, 30(4):521-529.

- [10] ISLAM M S, BEAMISH J. Piezoelectric creep in LiNbO₃, PMN-PT and PZT-5A at low temperatures[J]. *Journal of Applied Physics*, 2019, 126(20):204101.
- [11] ZHU J, WANG H, ZHANG F, et al. High-performance SAW low temperature sensors with double electrode transducers based on 128° YX LiNbO₃[J]. *Micromachines*, 2022, 13(11):1912.
- [12] 房赛. 阵列式无线无源声表面波温度传感器[D]. 成都:电子科技大学,2022.
FANG S. Wireless and passive surface acoustic wave array sensors[D]. Chengdu: School of Electronic Science and Engineering,2022.
- [13] RALIB A M, NORDIN A N, ALAM A Z, et al. Piezoelectric thin films for double electrode CMOS MEMS surface acoustic wave (SAW) resonator[J]. *Microsystem Technologies*, 2015, 21(9):1931-1940.
- [14] KALETTA U C, SANTOS P V, WOLANSKY D, et al. Monolithic integrated SAW filter based on AlN for high-frequency applications[J]. *Semiconductor Science and Technology*, 2013, 28(6):065013.
- [15] BJURSTRÖM J, WINGQVIST G, YANTCHEV V, et al. Temperature compensation of liquid FBAR sensors[J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2007, 17(3):651-658.
- [16] SHIN J, YOO H, SEONG M, et al. High-frequency characterization for SAW interdigital transducers[J]. *Journal of the Korean Physical Society*, 2022, 81(10):954-964.
- [17] OH H, LEE K, EUN K, et al. Development of a high-sensitivity strain measurement system based on a SH SAW sensor[J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2012, 22(2):025002.
- [18] CRUPI G, GUGLIANDOLO G, CAMPOBELLO G, et al. Measurement-based extraction and analysis of a temperature-dependent equivalent-circuit model for a SAW resonator; from room down to cryogenic temperatures[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2021, 21(10):12202-12211.
- (上接第 870 页)
- [17] LIU B, GUO J, LUO Z. Surface acoustic wave resonator echo signal frequency estimation[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2019, 49(9):2087-2094.
- [18] CHARGÉ P, WANG Y, SAILLARD J. A non-circular sources direction finding method using polynomial rooting[J]. *Signal Processing*, 2001, 81(8):1765-1770.
- [19] WAGNER M, PARK Y, GERSTOFT P. Gridless DOA estimation and root-MUSIC for non-uniform linear arrays[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2021, 69:2144-2157.
- [20] ABDULHAMMED O Y. Load balancing of IoT tasks in the cloud computing by using sparrow search algorithm[J]. *Journal of Supercomputing*, 2021, 21(7):1-22.