

# 面向高温传感的 AlN/Sapphire 声表面波谐振器研究

吕光耀<sup>1</sup>, 刘露遥<sup>1</sup>, 张巧珍<sup>1</sup>, 韩 韬<sup>2</sup>  
(1 上海师范大学信息与机电工程学院 上海 200233;  
2 上海交通大学仪器科学与工程系 上海 200240)

**摘要:** 目前, 基于硅酸镓镧 (LGS) 的无线 SAW 传感器能够在高达 600 °C 的温度下工作。但随着频率和温度的增加, LGS 的传播损耗也会急剧上升, 因此基于 LGS 的 SAW 传感器工作频率仅在 1 GHz 左右。而基于氮化铝/蓝宝石 (AlN/sapphire) 结构的声表面波 (SAW) 谐振器因其耐高温、高  $Q$  值、低传播损耗在高温传感领域有着巨大的应用前景。本文针对基于 AlN/sapphire 结构 SAW 谐振器, 采用耦合模式 (COM) 模型结合有限元 (FEM) 方法, 建立了仿真谐振器的有效模型。研究了不同的叉指换能器 (IDT) 对数、反射栅对数及孔径长度对器件性能的影响, 模拟了不同温度下的谐振频率与温度的关系, 并与实验结果进行对比。结果表明: 谐振器的工作频率高达 2.45 GHz, 在高达 500 °C 的温度范围内可靠工作, 频率温度特性具有较好的线性度, 温度系数高达  $-67 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ 。这为设计高性能的声表面波高温传感器提供了重要的参考。

**关键词:** 声表面波; 谐振器; 氮化铝; 高温传感; FEM

中图分类号: TN305.92

文献标志码: A

文章编号: 2095-1000(2025)03-0076-07

DOI: 10.12347/j.ycyk.20250123001

CSTR: 32406.14.ycyk.20250123001

引用格式: 吕光耀, 刘露遥, 张巧珍, 等. 面向高温传感的 AlN/Sapphire 声表面波谐振器研究[J]. 遥测遥控, 2025, 46(3): 76-82.

## Research on AlN/sapphire SAW Resonator for High Temperature Sensing

LYU Guangyao<sup>1</sup>, LIU Luyao<sup>1</sup>, ZHANG Qiaozhen<sup>1</sup>, HAN tao<sup>2</sup>

(1. College of Information, Mechanical and Electrical Engineering, Shanghai Normal University, Shanghai 200233, China;

2. Department of Instrument Science and Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

**Abstract:** The current wireless SAW (Surface Acoustic Wave) sensor based on langasite (LGS) can work at temperatures as high as 600 °C. Nevertheless, the propagation loss of LGS increases significantly as frequency and temperature increase, which limits the operating frequency of the SAW sensor based on LGS to 1 GHz. However, SAW resonator based on AlN/sapphire structure exhibits gigantic potential for high-temperature sensing applications due to its resistance to high temperatures, high  $Q$ -factor, and low propagation loss. In this work, an efficient model for SAW resonator based on AlN/sapphire is developed using the coupled mode (COM) theory combined with the finite element method (FEM). The influence of different numbers of interdigital transducers (IDT), reflective gratings, and different aperture lengths on device performance are investigated. Furthermore, the relationship between resonant frequency and temperature at various temperatures is simulated, which compares well with that of the experimental results. The investigation results show that the resonator works reliably in the temperature range of up to 500 °C and the operating frequency of up to 2.45 GHz. The frequency-temperature characteristics exhibit good linearity, with a temperature coefficient of  $-67 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ . This work provides an important reference for designing high-performance SAW high-temperature sensors.

**Keywords:** SAW; Resonator; AlN; High temperature sensing; FEM

**Citation:** LYU Guangyao, LIU Luyao, ZHANG Qiaozhen, et al. Research on AlN/sapphire SAW Resonator for High Temperature Sensing[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2025, 46(3): 76-82.

## 0 引言

声表面波 (Surface Acoustic Wave, SAW) 技术

在传感器和滤波器领域中扮演着至关重要的角色, 是近代声学中的压电学研究成果和微电子技术有机结合的产物。因其对温度、力、电场、质量加

载以及边界条件变化的高度敏感性而被广泛研究<sup>[1-3]</sup>。SAW传感器不仅能够实现小型化设计,还具备高精度、高工作频率的优势,并且在恶劣环境和强干扰条件下依然保持出色的稳定性和可靠性。SAW传感器是一种借助无线读取系统和SAW芯片的无源传感器,它无需电池供电即可实现物理信号和电学信号的转换,这有效地解决了有源传感器的电源环境适应性及维护问题。此外,由于传感信号的无线传输,不存在走线、线路干扰及热防护问题,可以应用于剧毒危险、旋转等恶劣环境。因此,SAW传感器对航空航天、高温作业等苛刻环境下的应用研究具有重要的意义。

然而,设计应用于高温环境的SAW传感器是一项挑战,耐高温的传感器材料,包括压电基板和电极薄膜的选择成为关键。目前,硅酸镓镧(La<sub>3</sub>Ga<sub>5</sub>SiO<sub>14</sub>, LGS)是被广泛认定为高温SAW传感应用的衬底。基于LGS的无线SAW传感器能够在高达600 °C的温度下稳定工作。这使得LGS成为高温环境中应用的理想材料,尤其在航空航天、汽车和工业设备的温度监控中,具有显著优势。尽管如此,LGS在高温下也存在一些明显的缺陷。随着频率和温度的增加,LGS的传播损耗会急剧增加。受此限制,LGS在高温条件下的有效工作频率被限制在1 GHz之内<sup>[4-6]</sup>。而相比于传统的压电材料和硅酸镓镧,氮化铝/蓝宝石(AIN/sapphire)

结构具有出色的压电特性、高温性能和机电耦合系数,尤其是在高频段,仍能保持非常低的声波传播损耗。

AIN/sapphire结构相较于传统高温材料的优良特性如表1所示。表1详细展示了AIN/sapphire结构、硅酸镓镧、石英(ST X-Quartz)、铌酸锂(LiNbO<sub>3</sub>)和磷化镓(GaPO<sub>4</sub>)的材料性能<sup>[7-9]</sup>。在耐高温性能方面,相较于石英与铌酸锂,AIN/Sapphire层状结构展现出了卓越的高温耐受性,该结构能在多种环境中承受高温,包括在真空环境下耐受1 040 °C的高温,在氮气/氢气氛围中耐受高达1 200 °C的温度,以及在空气氛围中于700 °C~800 °C的温度范围内保持稳定。在工作频率方面,AIN/Sapphire结构的声表面波(SAW)传播速度高达5 600 m/s,这一特性使其能够在更高的频率下有效工作。此外,该结构具有较低的机电耦合系数(0.3%~0.6%),这一特性使得其SAW更为适宜作为传感器使用,在检测外界物理量变化时表现出更高的灵敏度。尤为重要的是,AIN/Sapphire结构具有极低的声波传播损耗。在1GHz的频率下,其传播损耗仅为0.3 dB/μs;而在2.45GHz的频率下,其声传播损耗也仅为3 dB/μs。这一性能远低于其他高温传感材料,进一步凸显了AIN/Sapphire结构在高温与高频应用中的优势。

表1 高温传感器材料性能对比

Table 1 Comparison of material parameters of high temperature sensor [4-6]

材料	耐受温度(°C)	波速(m/s)	K <sup>2</sup> (%)	传播损耗(dB/μs) 1 GHz/2.45 GHz
硅酸镓镧	1 470 °C	2 740	0.35	2.8 dB/μs(17 dB/μs)[4]
石英	573 °C	3 159	0.1	3 dB/μs(17dB/μs)[5]
磷化镓	940 °C	2 500	0.3	5 dB/μs(29 dB/μs)[4]
铌酸锂	<500 °C	3 488	4.5	1 dB/μs(4-6 dB/μs)[4,5]
AIN/sapphire	1 040 °C(真空)	5 600	0.3-0.6	0.3 dB/μs(3 dB/μs)[6]
	1 200 °C(N <sub>2</sub> /H <sub>2</sub> )			
	700~800 °C(空气)			

因此,本文基于耦合模式模型(COM)理论深入探究了AIN/sapphire声表面波谐振器在高温环境下的应用。利用COMSOL Multiphysics软件建立了AIN/sapphire结构的有限元法(Finite Element Method, FEM)周期结构模型。基于FEM的仿真结果提取了AIN/sapphire结构的SAW色散关系的特征量,并提取了STW-COM形式下的COM参量。

基于COM模型,模拟了不同的叉指换能器(IDT)对数、反射栅对数及孔径长度对基于AIN/sapphire结构SAW谐振器性能的影响。进一步地,基于FEM模型模拟了室温至500 °C范围内SAW传感器的谐振频率对温度的依赖性。结果表明,AIN/sapphire结构的SAW传感器具有高达 $-67 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ 的温度系数。基于AIN/sapphire结构的SAW传感器在高

温环境下具有显著的优势和巨大的应用前景。

## 1 耦合模COM理论

在现有的SAW器件模拟技术中, 耦合模式模型(COM)被证明是设计声表面波器件的一种有效的模拟方法<sup>[10-12]</sup>。COM理论是一种基于声表面波与载波电路之间的耦合效应的理论框架, 用于描述声表面波器件中声表面波与电信号之间的耦合效应。然而, COM模型是一个唯象模型, 它的COM参数必须首先通过测量或精确的理论来确定。Abbott和桥本等人进一步将Plessky色散关系与COM理论相结合<sup>[13]</sup>, 建立了STW-COM模型, 并提供了一种提取STW-COM参数的方法, 即FEM。基于FEM建立AlN/sapphire传感器的周期模型, 计算该结构下的导纳曲线, 通过提取与色散关系有关的特征量, 为提取COM参量提供有效的基础数据。由于导纳的数据来自FEM的计算结果, 数据稳定可靠, 提高了SAW器件的模拟精度。

SAW在周期结构中的传播示意图如图1所示, 中间为交错的叉指电极, 上下衔接金属汇流条并施加电压。假设在无限长周期光栅阵列中存在两种反向传播的声波模式 $R(x)$ 和 $S(x)$ , 二者相互耦合。同时外部激励源施加的电压再次产生声波模式。由于单周期内耦合作用微弱, 可以把两个相向的声波假设为线性关系即COM方程, 方程可以写成如下形式:

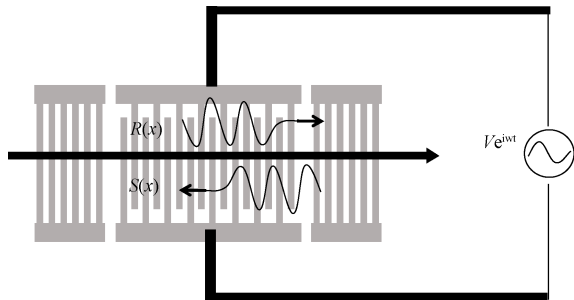


图1 周期结构中声表面波的传播

Fig. 1 Propagation of SAW in periodic structure

$$\begin{aligned} \frac{dR(x)}{dx} &= -i\Delta R(x) + ikS(x) + i\alpha V \\ \frac{dS(x)}{dx} &= -ikR(x) + i\Delta S(x) - i\alpha V \\ \frac{dI(x)}{dx} &= -2i\alpha R(x) - 2i\alpha S(x) + iwCV \end{aligned} \quad (1)$$

其中,  $k$ 为耦合系数,  $\alpha$ 为激励系数,  $C$ 为静电容,  $\Delta$ 为失谐参数, 定义如下:

$$\Delta = \frac{w}{v} - k_0 - i\gamma \quad (2)$$

$w=2\pi f$ , 其中 $f$ 为两波的频率。  $v$ 为SAW的有效波速,  $k_0$ 表示传播波数,  $\gamma$ 表示衰减。在式(1)中,  $v$ 、 $\kappa$ 、 $\alpha$ 、 $\gamma$ 、 $C$ 等五个自变量都是需要确定的COM参数。依据有限元方法(FEM)对SAW器件的精确模拟可以为COM参量的提取提供精确的基础数据, 进而准确地提取COM参数, 实现对AlN/sapphire结构的SAW精确的模拟。

## 2 SAW谐振器的仿真与模拟

### 2.1 周期结构SAW谐振器的FEM建模

在使用有限元方法分析声学器件时, 边界条件的设置合理与否直接决定了器件响应计算结果是否准确<sup>[14]</sup>。设置电极区域为线性弹性材料, 压电层区域为压电材料, 同时添加电荷守恒条件。考虑SAW器件电极周期特性, 设置周期边界条件并引入完美匹配层以缩减模型尺寸, 从而显著缩短计算时间。选择静电(Electrostatics)和固体力学(Solid Mechanics)接口, 并通过耦合的方式得到压电效应(Piezoelectric Effect)多物理场。参考实际器件结合型简化假设条件设置几何尺寸, 对电极、压电衬底对应几何域指定材料。根据材料各向异性以及晶体切向等特性, 正确地设置材料参数及参考坐标系。

利用COMSOL Multiphysics 6.1软件对基于AlN/sapphire结构的SAW谐振器进行建模如图2所示。从模型的自上而下的层次结构来看, 顶部是叉指换能器(IDT), 换能器下方是氮化铝层, 被设置为压电层并添加电荷守恒条件。底层为sapphire层, sapphire层分为基底层和完美匹配层(PML)层, PML层用于缩减模型尺寸, 缩短计算时间。该模型的左右和前后设置有周期性边界条件。氮化铝和sapphire的材料参数来自于文献[15-17]。并且基于FEM模型, 增加考虑材料的温度系数以及热应变对SAW特性的影响。具体做法是在压电场的基础上耦合温度场, 从而实现温度偏场下的SAW器件仿真, 进而分析SAW器件频率温度特性<sup>[18]</sup>。

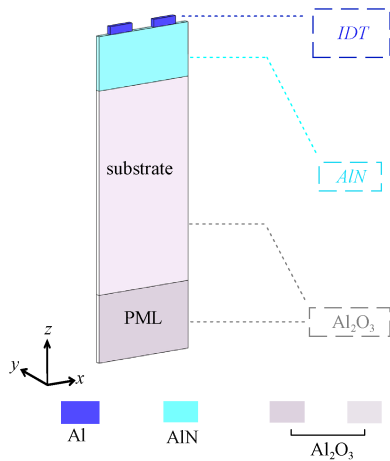


图2 AlN/sapphire结构SAW谐振器FEM模型

Fig. 2 FEM model of SAW sensor on AlN/sapphire structure

### 2.2 有限长SAW谐振器的COM模拟结果

基于上述周期结构FEM模型，提取AlN/sapphire层状结构上SAW谐振器的COM参数，进一步采用COM模型对有限长的SAW谐振器进行模拟。其中，FEM模型中的电极材料采用镍铝(NiAl)，叉指换能器(IDT)的波长为 $2.3\ \mu\text{m}$ ，电极厚度为 $80\ \text{nm}$ ，反射栅的波长为 $2.3\ \mu\text{m}$ ，金属化率为 $0.7$ ，孔径为 $95\ \mu\text{m}$ ，氮化铝厚度为 $1\ \mu\text{m}$ ，sapphire的厚度为 $1\ \mu\text{m}$ 。

在SAW器件中，为了保证器件性能叉指换能器的对数通常设置为50到200对，孔径一般设置为波长的10到20倍<sup>[19,20]</sup>。随着电极对数与孔径的增加，谐振器的品质因数(Q值)会显著提高。然而，这一增加同时也伴随着器件尺寸的增大和杂散模式幅度的急剧上升。设计SAW传感器时，需要综合考虑上述因素，以确保在不影响器件性能的前提下，尽可能地减小器件的尺寸。因此通过FEM和COM方法研究AlN/sapphire的声学模态和特征尤为重要。

#### 2.2.1 IDT对数对AlN/sapphire谐振器性能的影响

首先，我们模拟了不同IDT对数对谐振器的影响，反射栅对数设置为150对。如图3所示，不同IDT对数的导纳模拟结果。当IDT对数为50对时，导纳振幅很小，约为 $2\ \text{mS}$ ；当IDT对数为200对时，导纳的振幅为 $32\ \text{mS}$ 。随着IDT的对数逐步增加，可以看到导纳的振幅逐步增大，谐振频率和反谐振频率略微降低。在 $2.460\ \text{GHz}$ 处有微弱的杂散出现。而当IDT对数达到200对时，谐振器的Q值达到了3500，此时工作频率为 $2.458\ \text{GHz}$ 。

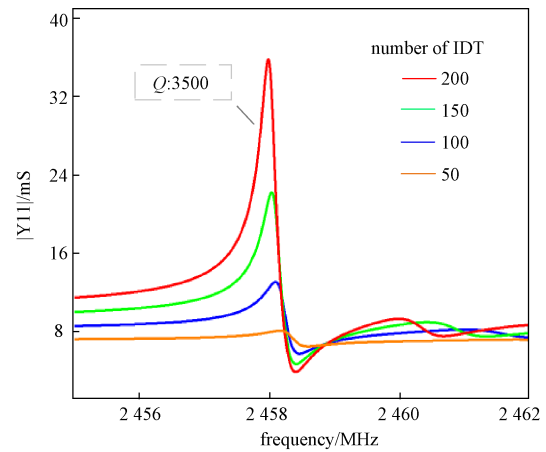


图3 不同IDT数量的SAW谐振器的COM模拟结果

Fig. 3 COM simulation results of SAW sensors with different IDT numbers

#### 2.2.2 反射栅对数对AlN/sapphire谐振器性能的影响

其次，我们模拟了不同反射栅对数对谐振器的影响，IDT对数设置为100对，不同反射栅对数下的导纳曲线如图4所示。当反射栅对数为50对时，导纳振幅约为 $3\ \text{mS}$ ；而当反射栅对数为100对时，导纳的振幅为 $9\ \text{mS}$ 。随着反射栅的对数逐步增加，能量越来越集中，可以看到导纳的振幅逐步提高，谐振频率和反谐振频率略微降低，而此时的工作频率仍在 $2.458\ \text{GHz}$ 附近。当反射栅对数达到200对时，虽然导纳的振幅提高到了 $15\ \text{mS}$ ，但在 $2.460\ \text{GHz}$ 处有剧烈的杂散出现，且相较于IDT对数增加引起的杂散，这里的杂散更为剧烈。

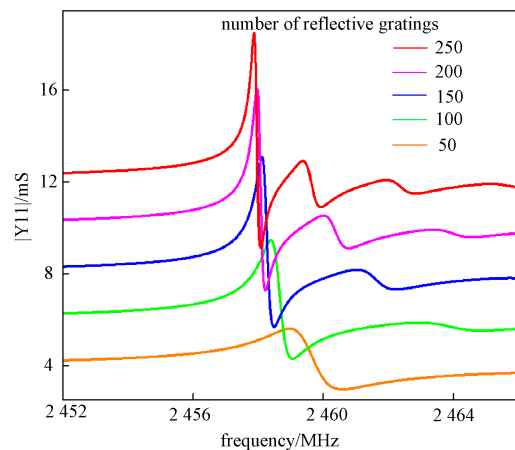


图4 不同反射栅数量的SAW谐振器的COM模拟结果

Fig. 4 COM simulation results of SAW sensors with different number of reflective gratings

### 2.2.3 不同孔径长度对AlN/ sapphire谐振器性能的影响

针对不同孔径长度对谐振器的影响, IDT对数设置为100对, 反射栅对数为150对。如图5所示, 导纳的振幅随着孔径的增加而增加。当孔径为50 μm时, 导纳的振幅约为4 mS; 当孔径增加到200 μm时, 导纳的振幅约为15 mS。可以看到, 随着孔径的增加, 谐振器的振幅在2.458 GHz频点上逐步增加, 频率并未发生偏移。并且位于反谐振右侧的杂散也略有提高, 杂散频点也未发生变化。

基于耦合模理论(COM)对基于AlN/sapphire结构的谐振器的仿真结果可以发现, 反射栅和IDT对数的增加在提高导纳振幅的同时, 会引起工作频率的微小偏移及额外杂散响应。其中, 反射栅增加引起的杂散更为剧烈。另一方面, 孔径的增加也会进一步提升导纳的振幅, 略微引起杂散, 但不会影响谐振器的工作频率。

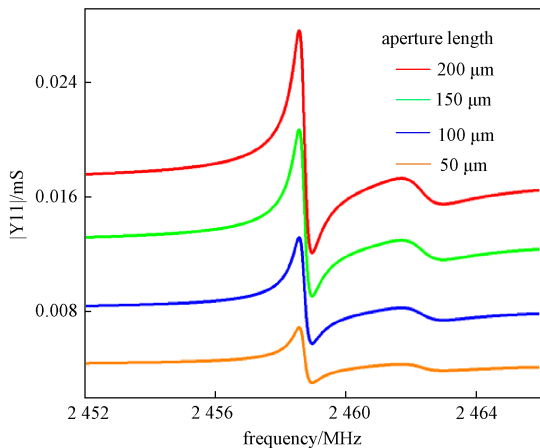


图5 不同孔径长度的SAW谐振器的COM模拟结果  
Fig. 5 COM simulation results of SAW sensors with different aperture lengths

### 2.2.4 AlN/sapphire谐振器的高温性能模拟

基于FEM建立的AlN/sapphire结构谐振器模型, 我们模拟了不同温度下的谐振频率与温度的关系。利用COMSOL软件对图2所示的SAW模型施加温度偏场, 从而将温度变化引起的热应变对AlN器件特性的影响考虑进来, 并且AlN的材料常数与温度的关系满足以下方程<sup>[18]</sup>:

$$C_{ijkl}^T = C_{ijkl} (1 + C_{ijkl}^{(1)} \Delta T + C_{ijkl}^{(2)} \Delta T^2 + C_{ijkl}^{(3)} \Delta T^3) \quad (3)$$

其中,  $\Delta T = T - T_0$ ,  $T_0$ 为室温温度, 取25 °C,  $T$ 为施加温度。 $C_{ijkl}^T$ 为室温下的弹性劲度系数,  $C_{ijkl}^{(i)}$ 是AlN的*i*阶温度系数。

如图6所示, 因为AlN的温度系数(TCF)为负值, 可以观察到频率随着温度的升高而降低。并且随着温度升高, 材料会发生热膨胀, 导致声速降低, 损耗增加。而在SAW器件中声速与频率的关系以式(2)描述。当声速降低时, 其谐振频率也会降低。

$$f = \frac{V_0}{\lambda} \quad (4)$$

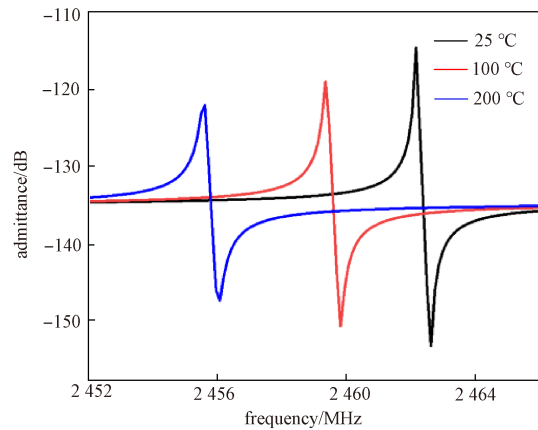


图6 不同温度下的SAW谐振器导纳模拟结果  
Fig. 6 Simulation results with admittance of SAW resonator at different temperatures

同时, 我们模拟了谐振频率随温度变化的关系。如图7所示, 仿真的温度系数高达 $-67 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ 。同时, 频率随温度变化的拟合曲线的决定系数( $R^2$ )达到0.999 81, 呈现高度的相关性。AlN/sapphire谐振器的谐振频率随温度呈现出显著的高度线性的变化趋势。在考虑实际制备工艺误差的情况下, 仿真结果与实际制备数呈现高度的一致性<sup>[21]</sup>。如

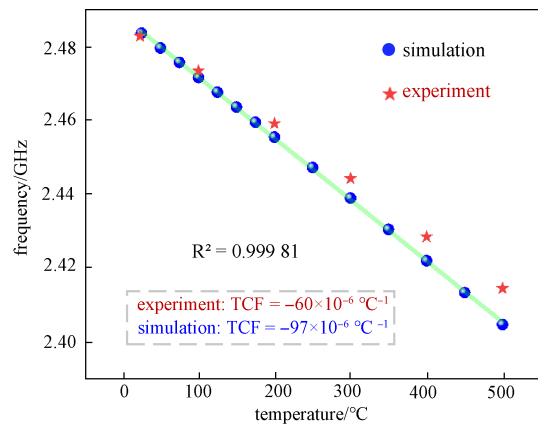


图7 SAW谐振器谐振频率对温度的依赖  
Fig. 7 Dependence of resonant frequency of SAW resonator on temperature

图7所示,图7中的实验数据来源于文献[21]。AlN/sapphire结构的谐振器仿真的温度系数达到了 $-67 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ ,温度可以达到 $500 \text{ }^\circ\text{C}$ 。仿真的频率随温度变化的拟合曲线的决定系数( $R^2$ )达到0.99981,显示出两者之间具有高度的相关性。这说明AlN/sapphire结构在温度变化条件下表现出极高的稳定性和巨大的应用潜力。

### 3 结束语

本文基于COM理论和有限元方法FEM对AlN/sapphire结构的SAW谐振器在高温环境下的传感应用进行了深入的研究。通过优化设计,本文探讨了不同的叉指换能器(IDT)对数、反射栅对数及孔径长度对基于AlN/sapphire结构SAW谐振器的性能影响。同时,基于FEM模型,增加考虑材料的温度系数以及热应变对SAW特性的影响,在压电场的基础上耦合温度场,我们模拟了SAW谐振器在不同温度下的谐振频率的变化。研究表明,AlN/sapphire结构的谐振器具有非常优异的高温性能和稳定性,谐振频率随温度呈现出显著的线性变化趋势。工作频率达到了 $2.45 \text{ GHz}$ ,能够在高达 $500 \text{ }^\circ\text{C}$ 的温度范围内可靠工作,温度系数高达 $-67 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ 。本文基于耦合模式模型(COM)理论和FEM方法深入探究了AlN/sapphire声表面波谐振器在高温环境下的特性,这为设计高性能的声表面波高温传感器提供了重要的参考。

在高温环境下,传统高温传感器材料会因热膨胀、热应力等问题导致性能急剧下降。而AlN/sapphire声表面波器件能够有效地耐受高温环境的影响,不仅具备低传播损耗和高频率特性的显著优势,也能够确保信号在传输过程中的高效性和稳定性,适用于航空、航天、石油、化工等高温环境下的监测和测量工作,AlN/sapphire声表面波器件在高温和高温传感器系统中具有巨大的应用前景。

### 参考文献

- [1] MANDAL D, BANERJEE S. Surface acoustic wave (SAW) sensors: Physics, materials, and applications[J]. *Sensors*, 2022, 22(3): 820.
- [2] POHL A. A review of wireless SAW sensors[J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency control*, 2000, 47(2): 317-332.
- [3] LI M, XIA X, LI K, et al. High performance SAW resonators using  $\text{LiTaO}_3/\text{SiO}_2/4\text{H-SiC}$  multilayer substrate[J]. *IEEE Electron Device Letters*, 2022, 43(10): 1772-1775.
- [4] DA CUNHA M P, LAD R J, MOONLIGHT T, et al. Recent advances in harsh environment acoustic wave sensors for contemporary applications[J]. *Sensors*, 2011 IEEE, 2011: 614-617.
- [5] LI X, QIN L, GUO L, et al. Flexible langasite-based surface acoustic wave strain sensor for high-temperature operation[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2023, 23(16): 18022-18031.
- [6] ZHANG J, CHENG W H, WANG H, et al. Langasite-based SAW high-temperature vibration sensor with temperature decoupling[J]. *Science China Technological Sciences*, 2024, 67(6): 1946-1956.
- [7] FACHBERGER R, BRUCKNER G, HAUSER R, et al. Wireless SAW based high-temperature measurement systems[C]. *IEEE International Frequency Control Symposium and Exposition*. IEEE, 2006: 358-367.
- [8] MORGAN D. Surface acoustic wave filters: With applications to electronic communications and signal processing [M]. Academic Press, 2010.
- [9] KAMEDA S, SHIBATA T, NAKASE H, et al. Fabrication of 5-GHz-band SAW filter with atomically-flat-surface aln on sapphire[C]. *IEEE Ultrasonics Symposium*, 2004. IEEE, 2005.
- [10] 苏波, 王为标, 王昊, 等. 基于有限长FEM/BEM提取COM参量[J]. *压电与声光*, 2014, 36(2): 167-170.
- [11] LI L, ZHANG Q, YANG Y, et al. The extraction of coupling-of-modes parameters in a layered piezoelectric substrate and its application to a double-mode SAW filter [J]. *Micromachines*, 2023, 14(12): 2205.
- [12] PLESSKY V, KOSKELA J. Coupling-of-modes analysis of SAW devices[J]. *International Journal of High Speed Electronics and Systems*, 2000, 10(04): 867-947.
- [13] ABBOTT B, GAMBLE K, NAUMENKO N, et al. COM model characterization for RF SAW devices[C]// *IUTAM Symposium on Recent Advances of Acoustic Waves in Solids: Proceedings of the IUTAM Symposium on Recent Advances of Acoustic Waves in Solids, Taipei, Taiwan, China. May 25-28, 2009*. Dordrecht: Springer Netherlands, 2010: 281-292.
- [14] 李百川. 射频前端SAW/BAW器件的非线性研究[D]. 上海, 上海师范大学, 2023.

- [15] SHU L, PENG B, LI C, et al. The characterization of surface acoustic wave devices based on AlN-metal structures[J]. *Sensors*, 2016, 16(4): 526.
- [16] ROUVAEN J M, MENHAJ-RIVENQ A, LOGETTE P, et al. Simultaneous generation of longitudinal and shear bulk ultrasonic waves in solids[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2000, 33(11): 1287.
- [17] WACHTMAN Tefft Jr, J B, et al. Elastic constants of synthetic single crystal corundum at room temperature [J]. *Journal of Research of the National Bureau of Standards. Section A, Physics and Chemistry*, 1960, 64(3): 213.
- [18] 张巧珍, 王为标, 韩韬, 等. 基于 COMSOL 的声表面波温度特性建模仿真[C]// 第十三届全国敏感元件与传感器学术会议论文集. 2014: 48-51.
- [19] XUE T, XU F, TAN Q, et al. LGS-based SAW sensor that can measure pressure up to 1000°C[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2022, 334: 113-315.
- [20] WU S, WU Z, BAO F, et al. High-Q resonator-inductor using LiNbO<sub>3</sub> plate for frequency tuning in 1-5 GHz[J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 2022, 69(7): 2331-2338.
- [21] YOUBI U, SAMI H A L I, ZHANG Q, et al. High-Q wireless SAW sensors based on AlN/Sapphire Bilayer Structure, operating at 2.45 GHz range for high-temperature applications[J]. *IEEE Sensors Letters*, 2024.

#### [作者简介]

- 吕光耀 1994年生, 硕士。  
刘露遥 1999年生, 硕士。  
张巧珍 1988年生, 副教授, 硕士生导师。  
韩韬 1973年生, 教授, 博士生导师。

(本文编辑: 赵尹默)