

# LGS 声学特性分析及自然单向性抑制方法

孙铭辰<sup>1,2</sup>, 胡梵冰<sup>1,2</sup>, 程利娜<sup>1</sup>, 王文<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院声学研究所, 北京 100190; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:**  $(0^\circ, 138.5^\circ, 26.5^\circ)$  硅酸镓镧(LGS)基底存在的自然单向性导致声能叠加不完全, 出现了能量泄露。分析了表面负载不同厚度的 Pt 薄层时,  $(0^\circ, 138.5^\circ, 26.5^\circ)$  LGS 衬底的声学特性变化, 结果表明, Pt 薄层的归一化厚度在 2%~3% 时, LGS 基底慢度曲线对称性显著改善。采用有限元法, 结合三维周期性模型频响曲线验证了理论计算结果的有效性, 并进一步分析了归一化厚度为 2.5%~2.9% 的 Pt/LGS 频响结果。结果表明,  $h/\lambda=2.7\%$  和 2.8% 时第二谐振峰完全消失, 基底自然单向性被完全抑制。为抑制  $(0^\circ, 138.5^\circ, 26.5^\circ)$  LGS 基底自然单向性提供了最佳 Pt 电极厚度, 能有效抑制双谐振峰的出现, 减少能量泄露, 为高性能谐振器设计提供了理论基础。

**关键词:** 硅酸镓镧(LGS); 声表面波(SAW); 谐振器; 自然单向性; 有限元法

**中图分类号:** TN384; TN65 **文献标识码:** A

## Analysis of Acoustic Properties of LGS and Methods to Suppress Natural Unidirectionality

SUN Mingchen<sup>1,2</sup>, HU Fanbing<sup>1,2</sup>, CHENG Lina<sup>1</sup>, WANG Wen<sup>1,2</sup>

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

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:**  $(0^\circ, 138.5^\circ, 26.5^\circ)$  Langasite (LGS) exhibits natural unidirectionality, resulting in the incomplete superposition of acoustic energy and energy leakage. This study analyzed the acoustic properties of  $(0^\circ, 138.5^\circ, 26.5^\circ)$  LGS substrates when loaded with Pt thin films of varying thicknesses. The results indicate a remarkable improvement in the symmetry of the slowness curve of the LGS substrate when the normalized thickness of the Pt thin film is between 2% and 3%. The effectiveness of theoretical calculations was validated by simulations based on the finite element method combined with three-dimensional periodic model frequency response curves. Further analysis of Pt/LGS frequency response at normalized thicknesses ranging from 2.5% to 2.9% demonstrated complete disappearance of the second resonance peak at  $h/\lambda=2.7\%$  and 2.8%, entirely suppressing the natural unidirectionality of the substrate. This study provides the optimal Pt electrode thickness to restrain the occurrence of dual resonance peaks, reduce energy leakage, and establish a theoretical basis for designing high-performance resonators.

**Key words:** langasite (LGS); surface acoustic wave (SAW); resonator; natural unidirectionality; finite element method

## 0 引言

声表面波(SAW)传感器件因具有小尺寸、高灵敏、低功耗、快速响应及可实现无线无源传感等特性而受到广泛关注<sup>[1]</sup>。其工作的基本原理是通过对压电材料表面传播的声波进行调制解调, 实现信号的采集与传感, 广泛应用于温度、应变、压力、气体、磁场等物理参量的测量<sup>[2-3]</sup>。SAW 传感器在极端环境下的应用极具前景, 研究表明, 其在 300~1 000 °C 内以及

高磁场、高电场、电离辐射和腐蚀性化学环境中均能稳定工作<sup>[4]</sup>。同时, SAW 传感器作为一种无源敏感元件, 可通过接收询问射频信号本身的部分能量进行工作, 不需要布线和额外供电, 适用于极端恶劣的工业应用环境<sup>[5]</sup>。

硅酸镓镧(LGS)是一种耐高温压电材料<sup>[6-7]</sup>, 其晶体结构与石英相似, 具有较大的机电耦合系数, 在 1 470 °C 时不发生相变<sup>[8]</sup>, 且在高温下具有较高的电

收稿日期: 2024-07-09

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2024YFE0199800)

作者简介: 孙铭辰(2001-), 男, 河南省南阳市人, 硕士生。通信作者: 王文(1976-), 男, 研究员, 博士生导师。

阻率及较低的介电损耗,适用于高温应用环境<sup>[9-10]</sup>。通过研究 LGS 的最优切型,得到了具有零能流角、零温度系数、大机电耦合系数的旋转角,并以 LGS 为基底制备了声表面波传感器<sup>[11]</sup>。但硅酸镓镧压电材料存在模式耦合、自然单向性等问题<sup>[12]</sup>,自然单向性是由于电极激发中心和反射中心不重合而产生了两个谐振峰,导致输入能量在频谱上分散,影响能量转换效率,对器件的频率选择性造成干扰,尤其是在耐高温重金属电极负载下,上述影响均会加剧<sup>[13-14]</sup>。因此,对 LGS 声学模式进行精确仿真并探索抑制自然单向性的方法具有重要意义<sup>[15]</sup>。

本文基于 $(0^\circ, 138.5^\circ, 26.5^\circ)$ LGS 基底材料,利用有效介电常数法计算得到 LGS 基底声传播方向慢度曲线,分别分析材料表面有无电极负载时的声学特性。提出通过调整电极的归一化厚度改善声学特性,采用有限元法建立无限长栅阵三维周期性模型,精确计算了不同厚度的 Pt 电极 LGS 基底谐振响应曲线,验证了 Pt 电极负载对 LGS 慢度曲线的调制作用,给出了抑制自然单向性效果最好的电极厚度,为在 LGS 上设计和制备 SAW 器件提供了新的理论依据。

### 1 Pt/LGS 双层介质声场特性分析

采用有效介电常数法分析了 $(0^\circ, 138.5^\circ, 26.5^\circ)$ LGS 衬底的声学特性。图 1 为 LGS 基底声传播方向慢度曲线。由图可看出,传播角波矢与相速度方向不同,说明此时激发的 SAW 为非纯模模式。这是因为该切型下压电衬底的弹性矩阵、耦合矩阵和介电矩阵均有较强的非对称性,波动方程无法分解为简并模式。

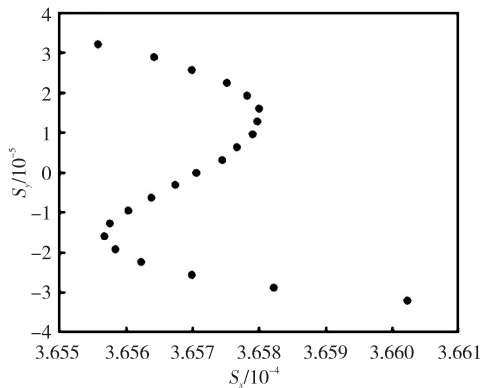


图 1 SAW 传播角附近小角度慢度曲线特性

研究了表面负载不同厚度的 Pt 薄层时,瑞利波声传播特性的变化情况,如图 2 所示。随着表面 Pt 薄层归一化厚度  $h/\lambda$  由 1% 增至 4%,瑞利波慢度曲

线特性有了较大改变,其对称性逐渐改善,说明瑞利波能量从 LGS 基底逐渐向 Pt 薄层中转移。当 Pt 薄层归一化厚度在 2%~3% 时,曲线对称性有明显改善,由此可推测,当基底表面负载该厚度区间的 Pt 薄层时能够有效抑制 LGS 基底材料的自然单向性。

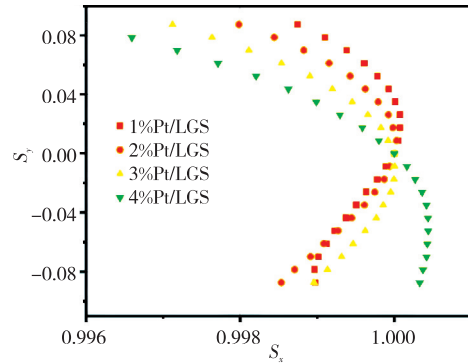


图 2 不同电极厚度的声传播特性曲线

### 2 建模与仿真过程

采用有限元法验证上述分析结果。图 3 为谐振器的基本结构,包括叉指换能器 (IDT) 和反射栅两部分。谐振器金属电极具有周期性,为了减少计算量、提高计算效率,选用 IDT 的一个周期进行仿真。建立无限长周期性栅阵模型,如图 4 所示,其中 SAW 波长为  $6.3 \mu\text{m}$ ,电极金属化比为 0.5。考虑到瑞利波只集中在表面 1~2 个波长,故设置 LGS 厚度为  $5\lambda$ 。模型中的材料参数设置如表 1 所示。

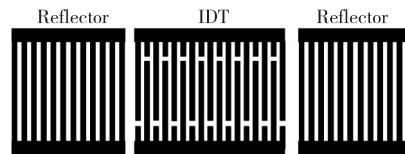


图 3 谐振器基本结构

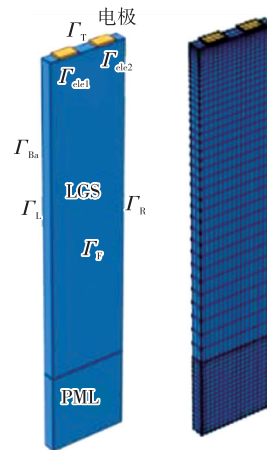


图 4 无限长周期性栅阵模型

表1 材料参数设置

密度/ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	刚度常数/GPa	耦合常数/ ( $\text{C} \cdot \text{m}^{-2}$ )	相对介电常数
5 764	$c_{11} = 188.9$	$e_{11} = -0.44$	$\epsilon_{11} = 19.05$
	$c_{12} = 104.2$		
	$c_{13} = 101.5$	$e_{14} = 0.10$	$\epsilon_{33} = 51.81$
	$c_{14} = 14.4$		
	$c_{33} = 268.3$		
	$c_{44} = 53.3$		
	$c_{66} = 42.4$		

边界条件设置如表2所示,对于力学边界条件,衬底顶部不受外力干扰,设为自由边界条件。为了实现周期无限延拓,在模型的左右、前后分别设置周期性边界条件。电极1的底面设置为接地,电极2的底面设置电势信号  $V=1$ 。

表2 边界条件设置

边界	固体力学边界条件	静电场边界条件
$\Gamma_T$	自由	零电荷
$\Gamma_B$	固定约束	零电荷
$\Gamma_L, \Gamma_R$	周期性条件	周期性条件
$\Gamma_F, \Gamma_{Ba}$	周期性条件	周期性条件
$\Gamma_{ele1}$	—	接地
$\Gamma_{ele2}$	—	电势、电荷

为了进一步仿真不同厚度的电极对瑞利波横向杂散模式的影响以及对基底自然单向性的抑制作用,建立包含孔径结构的无限长栅阵三维周期性模型,如图5(a)所示。图5(b)为网格剖分图,其中孔径长度为  $40\lambda$ ,假指长度为  $0.5\lambda$ ,汇流条宽度为  $5\lambda$ ,Gap长度为  $0.25\lambda$ 。材料参数与边界条件见表1-2。

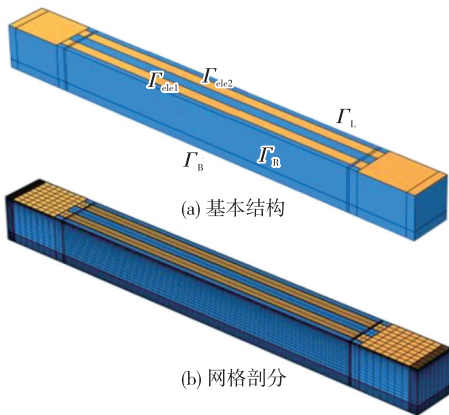


图5 包含孔径结构的无限长栅阵三维周期模型

### 3 结果与讨论

图6为无限长栅阵三维周期模型的频响曲线。由图可见,当归一化厚度为1%时,频响曲线上出现两个谐振峰,LGS基底具有较为明显的自然单向性。这是因为高非对称性晶体切向的压电材料本身具有自然单向性,而非金属电极的作用。随着金属电极厚度增加,压电晶体的自然单向性呈现先减弱后增强的趋势,尤其是在  $h/\lambda=3\%$ 时,第二谐振峰明显减弱,自然单向性明显得到抑制。上述结果与图2的计算结果具有较好的一致性,说明表面负载一定厚度的Pt电极对瑞利波慢度曲线具有一定的调制作用,能够抑制因压电晶体非对称切向导致的自然单向性。

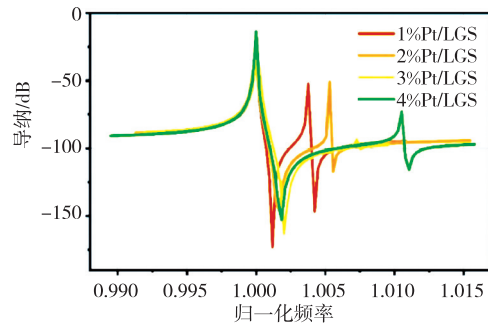


图6 不同归一化电极厚度下无限长栅阵三维周期模型频响曲线

根据上述分析结果可知,Pt电极归一化厚度在2%~3%时,具有良好的自然单向性抑制效果。图7为Pt电极归一化厚度在2.5%~2.9%时,无限长栅阵三维周期模型频响曲线。由图可见,第二谐振峰随着电极厚度的增加而呈现先减小后增大的趋势。当  $h/\lambda=2.7\%$ 和  $2.8\%$ 时,第二谐振峰完全消失,说明该厚度电极可完全抑制自然单向性,适用于高性能谐振器的设计。

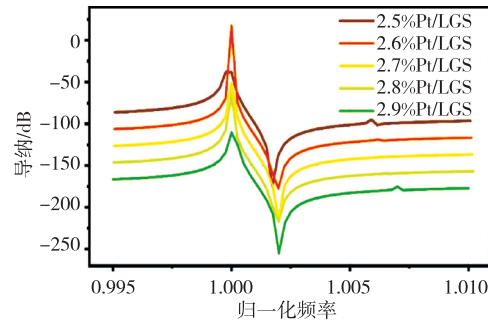


图7 归一化电极厚度为2.5%~2.9%时无限长栅阵三维周期模型频响曲线

#### 4 结束语

利用有效介电常数法分析了( $0^\circ$ ,  $138.5^\circ$ ,  $26.5^\circ$ )LGS衬底的声学特性,研究了表面负载不同厚度的Pt薄层时,瑞利波声传播特性的变化情况。研究发现,Pt薄层归一化厚度在 $2\% \sim 3\%$ 时,慢度曲线具有最好的对称性。采用有限元法,建立无限长栅阵三维周期性模型并进行仿真,发现当 $h/\lambda = 2.7\%$ 和 $2.8\%$ 时第二谐振峰完全消失。测试结果揭示了LGS的声学特性,给出了可用于抑制( $0^\circ$ ,  $138.5^\circ$ ,  $26.5^\circ$ )LGS自然单向性的Pt电极最佳厚度,对设计LGS基底的耐高温声表面波传感器具有重要的参考价值。

#### 参考文献:

- [1] HU F, CHENG L, FAN S, et al. Chip-level orthometric surface acoustic wave device with AlN/metal/Si multilayer structure for sensing strain at high temperature[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2022, 333:113298.
- [2] MANDAL D, BANERJEE S. Surface acoustic wave (SAW) sensors: Physics, materials, and applications [J]. *Sensors*, 2022, 22(3):820.
- [3] LIANG X, ZHANG L, TAN Q, et al. Temperature, pressure, and humidity SAW sensor based on coplanar integrated LGS[J]. *Microsystems & Nanoengineering*, 2023, 9(1):110.
- [4] NAUMENKO N F. Advanced substrate material for SAW devices combining LiNbO<sub>3</sub> and langasite [J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 2020, 67(9):1909-1915.
- [5] PAN Y, YAN C, GAO X, et al. A passive wireless surface acoustic wave (SAW) sensor system for detecting warfare agents based on fluoroalcohol polysiloxane film[J]. *Microsystems & Nanoengineering*, 2024, 10(1):4.
- [6] LI X, WANG W, FAN S, et al. Optimization of SAW devices with LGS/Pt structure for sensing temperature [J]. *Sensors*, 2020, 20(9):2441.
- [7] NAGMANI A K, BEHERA B. A review on high temperature piezoelectric crystal La<sub>3</sub>Ga<sub>5</sub>SiO<sub>14</sub> for sensor applications [J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 2022, 69(3): 918-931.
- [8] SUHAK Y, FRITZE H, SOTNIKOV A, et al. High-temperature electromechanical loss in piezoelectric langasite and catangasite crystals [J]. *Journal of Applied Physics*, 2021, 130(8):085102.
- [9] ZHOU X, TAN Q, LIANG X, et al. Novel multilayer SAW temperature sensor for ultra-high temperature environments [J]. *Micromachines*, 2021, 12(6):643.
- [10] XUE T, XU F, TAN Q, et al. LGS-based SAW sensor that can measure pressure up to 1 000 °C [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2022, 334:113315.
- [11] BERKENPAS E, BITLA S, MILLARD P, et al. Pure shear horizontal SAW biosensor on langasite [J]. *IEEE Trans Ultrason Ferroelectr Freq Control*, 2004, 51(11):1404-1411.
- [12] XU H, JIN H, DONG S, et al. Mode analysis of Pt/LGS surface acoustic wave devices [J]. *Sensors*, 2020, 20(24):7111.
- [13] XU H, JIN H, DONG S, et al. A langasite surface acoustic wave wide-range temperature sensor with excellent linearity and high sensitivity [J]. *AIP Advances*, 2021, 11(1):015143.
- [14] ZHANG J, JIN H, DONG S, et al. Surface acoustic wave strain sensor with ultra-thin langasite [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2022, 22(12): 11509-11516.
- [15] SHAN Q, SHI R, ZHANG Q, et al. Fabrication of grooved LGS resonators based high temperature SAW sensors and analysis with FEM simulation [J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2022, 32(10): 105005.