◇ 研究报告 ◇

# 基于指条厚度优化的冷凝式声表面波气体传感器 灵敏度提升方法

邹亮桃<sup>1,2</sup> 刘久玲<sup>1†</sup> 游 然<sup>1,2</sup> 刘明华<sup>1</sup> 任 伟<sup>1</sup> 何世堂<sup>1</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:** 该文通过对声表面波谐振器指条厚度的优化提升了冷凝式气体传感器的灵敏度。基于流固耦合理论, 利用有限元商业软件建立了有液膜负载和无液膜负载下的多物理场三维周期模型,并提取了相应的耦合模参 量,利用耦合模模型及**P**矩阵级联技术,计算了不同指条厚度下液膜负载引起的传感器响应,获得了冷凝式声 表面波气体传感器灵敏度随指条厚度的变化关系。实验中制备了6种不同电极厚度的声表面波谐振器,并利 用甲基膦酸二甲酯实验样品完成了传感器的响应测试,验证了理论分析的正确性。结果表明,冷凝式声表面波 气体传感器的灵敏度随指条厚度的增加先变大后减小,最优归一化电极厚度为6.4%~7.6%之间。该研究结果 对进一步提升传感器灵敏度具有重要意义。

关键词:冷凝式声表面波气体传感器;流固耦合理论;指条厚度优化;灵敏度
中图法分类号:TP212 文献标识码:A 文章编号:1000-310X(2022)03-0412-09
DOI: 10.11684/j.issn.1000-310X.2022.03.011

# The sensitivity enhancement method of condensing-type SAW gas sensor based on electrode thickness optimization

ZOU Liangtao<sup>1,2</sup> LIU Jiuling<sup>1</sup> YOU Ran<sup>1,2</sup> LIU Minghua<sup>1</sup> REN Wei<sup>1</sup> HE Shitang<sup>1</sup>

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

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

Abstract: This paper improves the sensitivity of condensing gas sensor by optimizing the electrode thickness of surface acoustic wave (SAW) resonator. Based on the fluid-solid coupling theory, the multi-physics threedimensional periodic model with and without liquid film load was established in the finite element commercial software, and the corresponding coupling mode (COM) parameters were extracted. Using the COM model and P-matrix cascade technology, the sensor response of liquid film load at different electrode thickness was calculated, and the variation curve of condensing SAW sensor's sensitivity with the electrode thickness was obtained. Experimentally, SAW detectors with six different electrode thicknesses were fabricated. Dimethyl methyl phosphonatesamples were used to test the performance of the sensor, which verified the correctness of the theoretical analysis. The results show that the sensitivity of the condensing SAW gas sensor first increases and then decreases with the increase of electrode thickness, and the optimal normalized electrode thickness is between 6.4% and 7.6%. The research results are of great significance to further improve the sensitivity of the sensor.

**Keywords:** Condensing-type surface acoustic wave gas sensor; The fluid-solid coupling theory; Electrode thickness optimization; Sensitivity

<sup>2020-06-24</sup> 收稿; 2022-04-12 定稿

作者简介: 邹亮桃 (1994-), 女, 湖南衡阳人, 硕士研究生, 研究方向: 声表面波技术。

<sup>†</sup>通信作者 E-mail: liujiuling@mail.ioa.ac.cn

# 0 引言

声表面波(Surface acoustic wave, SAW)气体 传感器因其灵敏度高、几何尺寸小、易于集成及 大规模生产等优点[1],在环境保护、公共安全以及 国防科技等多个领域具有广阔的应用前景。由于 SAW 检测器本身对待测气体没有选择性,只能够确 定检测量的大小,而不能分辨检测物的成分,需要与 化学手段结合才能实现定性。因此,典型的SAW气 体传感器常采用在器件表面涂覆选择性敏感膜的 方法来检测待测气体,但该方案受限于敏感膜限制 了气体检测的种类,并且存在交叉干扰问题<sup>[2]</sup>。20 世纪末,研究人员提出将SAW技术与传统的气相 色谱 (Gas chromatograph, GC) 联用<sup>[3]</sup>, 首先通过 气相色谱分离气体实现定性分析,继而将不同时间 上分离出来的气体附着于 SAW 器件表面实现定量 分析,从而克服了典型SAW气体传感器的缺点,成 功实现复杂环境下的气体分析。因此,GC/SAW系 统的相关研究受到广泛关注<sup>[2-7]</sup>。

在此基础之上,为了使GC/SAW联用技术更 好地满足实际应用的需求,研究人员进一步对影 响其灵敏度的因素进行了研究,包括谐振器的谐振 腔长度<sup>[8]</sup>、谐振器的负载区域位置<sup>[9]</sup>以及退火温 度<sup>[10]</sup>等,进一步提升了GC/SAW系统的性能。然 而,在指条厚度对SAW检测器灵敏度的影响方面, 相关研究较少。2019年,郝文昌等<sup>[11]</sup>研究了负载为 固体时,谐振器指条厚度对灵敏度的影响。然而,当 负载为液态时,指条厚度对SAW检测器灵敏度的 影响分析的研究却较少。考虑到液体层只能耦合声 纵波,而固体层却能耦合纵波和剪切波,因此,当固 体中的声波传播到液体中时的边界条件和声波在 两种固体之间传播时差别较大,所以对液膜负载的 模拟是很有必要的。因此,本文基于流固耦合理论 与压电效应相结合理论,探究了液态负载下谐振器 指条厚度对灵敏度的影响。

本文采用有限元商业软件建立流体负载与压 电效应相耦合的三维有限元模型,并结合SAW的 耦合模 (Coupling-of-modes, COM)理论实现对器 件的快速准确模拟。从理论和实验两方面研究了负 载为液膜时,谐振器指条厚度对冷凝式SAW气体 传感器灵敏度的影响,为GC/SAW系统检测性能 的提升提供新思路。

# 1 理论分析

GC/SAW系统的原理是首先利用GC柱出口 温度与SAW 检测器表面温度之间的温度差, 使待 测气体从GC柱口出来遇冷快速凝结吸附在SAW 检测器表面,从而在器件表面形成了一层薄液膜;然 后再利用液膜负载引起的器件表面边界条件的改 变,进而引起检测器频率的变化,如图1所示<sup>[12]</sup>。在 检测过程中待测气体冷凝形成液膜覆盖在器件表 面时,液膜直接接触的边界分为两种:一种与金属 指条直接接触;一种与压电基底直接接触。压电基 底上表面的边界条件是由液膜与压电基底和金属 指条与压电基底两种情况交叉形成的,如图2所示。 同时,声波在不同物质中的波动方程也是不一样的。 液体层只能耦合声纵波,而固体层却能耦合纵波和 剪切波,因此,固体中的声波传播到液体中和声波在 两种固体之间传播的边界条件不同造成了声波的 传播方式的改变。



Fig. 1 Adsorption principle



图2 有液膜负载的结构图

Fig. 2 Structure diagram with liquid membrane load

首先对压电晶体中的声场进行分析,需要同时 考虑力学作用和电学作用。在压电晶体中,不存在 彻体力,一般是绝缘体,不存在自由电荷。此时,压 电晶体内的耦合波动方程为<sup>[13]</sup>

$$\begin{cases} \rho \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} - c_{ijkl}^E \frac{\partial^2 u_k}{\partial x_l \partial x_j} - e_{kij} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x_k \partial x_j} = 0, \\ e_{jkl} \frac{\partial^2 u_k}{\partial x_l \partial x_j} - \varepsilon_{jk}^S \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x_k \partial x_j} = 0. \end{cases}$$
(1)

式(1)中,u、 $\phi$ 、 $\rho$ 分别为位移、电势、密度, $c^E$ 、e、 $\varepsilon^S$ 分别为晶体的弹性劲度常数、压电应力常数、介电 常数,i, j, k, l = 1, 2, 3。

当边界条件是由金属指条与压电基底构成时, 金属指条或各向同性固体中的波动方程为

$$c_{ijkl}^{L} \frac{\partial^2 u_k^{L}}{\partial x_l \partial x_j} = \rho^L \frac{\partial^2 u_i^{L}}{\partial t^2}.$$
 (2)

当边界条件是由液膜与压电基底构成时,液膜 中的波动方程需要考虑黏滞作用。根据纳维-斯托 克斯 (N-S) 方程,当液体的黏滞系数 μ 为常数时,液 膜中的波动方程为<sup>[7,14]</sup>

$$\rho_{l} \frac{\partial^{2} u_{i}^{l}}{\partial^{2} t} = c_{ijkl}^{l} \frac{\partial^{2} u_{k}^{l}}{\partial x_{l} \partial x_{k}} - \frac{2}{3} \mu j w \frac{\partial}{\partial x_{i}} (\nabla \cdot \boldsymbol{u}^{l}) + \mu j w \Big( \frac{\partial u_{i}^{l}}{\partial x_{j} \partial x_{j}} + \frac{\partial}{\partial x_{i}} (\nabla \cdot \boldsymbol{u}^{l}) \Big), i, j, k, l = 1, 2, 3,$$
(3)

式(2)中, $u^l$ 、 $\rho_l$ 分别表示位移和液体密度, $c^l_{ijkl}$ 为弹性劲度常数, $\nabla \cdot u^l$ 是位移的散度, $\mu$ 为黏滞系数。

其中,任何结构下介质中声波的准确求解都需 要从波动方程出发,得到 Christoffel 方程来求解得 到满足特定边界条件的声波解。由上述3个式子可 以看出,不同性质负载(固体、液体)的波动方程不 同,引起的边界条件也会有所差别。 为了分析复杂的不连续边界结构,本文将利用 耦合模理论结合多物理场耦合的有限元方法对液 膜负载下的器件响应开展仿真研究。

# 1.1 COM理论

COM 模型为模拟和仿真不同结构的 SAW 器件提供了有效的方法。忽略栅阵中传播损耗的影响, COM 方程可写为<sup>[15]</sup>

$$\begin{cases} \frac{\mathrm{d}R}{\mathrm{d}x} = -\mathrm{j}kR + \mathrm{j}\kappa S \exp\left(-2\mathrm{j}k_0x\right) \\ &+ \mathrm{j}\alpha V \exp\left(-\mathrm{j}k_0x\right), \\ \frac{\mathrm{d}S}{\mathrm{d}x} = -\mathrm{j}\kappa^* R \exp\left(2\mathrm{j}k_0x\right) \\ &+ \mathrm{j}kS - \mathrm{j}\alpha^* V \exp\left(\mathrm{j}k_0x\right), \\ \frac{\mathrm{d}I}{\mathrm{d}x} = -2\mathrm{j}\alpha^* R \exp\left(\mathrm{j}k_0x\right) \\ &- 2\mathrm{j}\alpha S \exp\left(-\mathrm{j}k_0x\right) + \mathrm{j}\omega CV, \end{cases}$$
(4)

其中,  $R 和 S 分别表示右向、左向传播的平面波, V 表示交变电压, I 表示交变电流, <math>k \ge SAW$ 的波数,  $k_0$ 是声同步波数,  $\kappa$ 表示耦合系数,  $\alpha$ 表示激发系数, C是单位长度的静态电容。

当V=0时, 叉指换能器 (Interdigital transducer, IDT) 的电端短路,此时栅阵中无激发源, 即相当于周期短路栅阵;当I=0时,IDT 的电端开 路,此时栅阵中不存在电流,即相当于周期开路栅 阵。根据文献 [9] 可知,通过周期短路栅阵和周期开 路栅阵的禁带边界频率可以直接推导出 COM 参量 (中心频率 $f_0$  (或传播速度v)、耦合系数 $\kappa$ 、激发系数  $\alpha$ 和静态电容C)的解析表达式:

$$\begin{cases} f_0 = \frac{f_{s+} + f_{s-}}{2}, \\ v = \lambda_0 \cdot f_0 = \lambda_0 \frac{f_{s+} + f_{s-}}{2}, \\ |\kappa|\lambda_0 = 2\pi \frac{f_{s+} - f_{s-}}{f_{s+} + f_{s-}}, \\ |\alpha| = \omega C \lambda_0 \pi \Big( \frac{f_{o+} - f_{o-}}{f_{s+} + f_{s-}} - 1 \Big). \end{cases}$$
(5)

当在Al电极上施加交变电压 $\Delta V$ 时,归一化静态电 容 $C_n$ 为

$$C_n = \frac{C\lambda}{W} = \frac{W_e}{(\Delta V)^2 W},\tag{6}$$

其中,W为声孔径。

# 1.2 有限元方法提取耦合模参量

COM 理论是一种近似的唯象模型,所用参量 的数值必须由精确理论或实验来确定,参量的准确 度决定了分析 SAW 器件的精确程度。因此为保证 COM 参量提取的准确性和便捷性,本文对器件进 行三维有限元分析,使用多物理场商业仿真软件建 立液膜负载下,流体声学与压电物理场的耦合物理 模型,提取特征频率,获得周期短路栅阵和周期开路 栅阵的禁带边界频率,进而对参量进行提取。

首先,在有限元商业软件中建立SAW 三维有 液膜负载的周期模型时,需要考虑液膜负载导致的 压电基底表面边界条件的不连续性。因此,应基于 流固耦合与压电效应相结合建立有液膜负载的三 维周期模型,如图3所示。其中,灰色区域为压电基 片,白色区域为理想导体的铝指条,同时,考虑到实 际的冷凝结果,沿*x*方向(*XY*平面)均保持一致高 度的表面深灰色区域为液膜负载。



图3 有液膜负载的三维周期模型

Fig. 3 Three-dimensional periodic model with liquid membrane load

其次关于边界条件。液膜与压电基片和指条的 连接界面上,由于介质属性不同(负载为流体、器件 为固体),存在流固边界,需额外考虑流固耦合作用。 因此,与无液膜负载的周期模型<sup>[11]</sup>相比,除了需要 ST-X石英压电基片与铝电极之间固体力学与静电 之间的压电耦合接口,还需要增加液膜与压电基片 和指条之间固体力学与压力声学之间的流固耦合 接口,此接口对应的流固边界条件为

$$-\boldsymbol{n} \cdot \left[ -\frac{1}{\rho_c} (\nabla p_t - \boldsymbol{q}_d) \right] = -\boldsymbol{n} \cdot \boldsymbol{u}_{tt},$$
$$F_A = p_t \boldsymbol{n}, \tag{7}$$

其中, $u_{tt}$ 是结构加速度,n是表面法线, $p_t$ 是总声 压, $F_A$ 是结构承受的载荷(每单位面积的力)。

其他具体的力学、电学以及压力声学的边界条 件列于表1。

表 1 模型的边界条件 Table 1 Boundary conditions of the model

边界	力学边界条件	电学边界条件
$\Gamma_T$ (指条上表面边界)	自由	零电荷
$\Gamma_B$ (下表面边界)	固定	零电荷
$\Gamma_L$ , $\Gamma_R$ (左右表面边界)	连续性周期边界条件	
$\Gamma_F, \Gamma_E$ (前后表面边界)	连续性周期边界条件	
$\Gamma_G$ (液膜的上表面边界)	软声场边界条件	

然后,采用立方体单元对图3中的模型进行网格划分。由于SAW主要在表面附近传播,位移最大, 且IDT是设计SAW器件的关键,为了使模拟结果 更精确,IDT和表面附近的网格密度更大。IDT结构的变形,使得液膜流场的计算域发生变化,要考虑 流场网格随声波变形以适应耦合界面的变形,还需 要考虑动网格中变形域的问题,因此液膜采用自由 四面体网格进行划分。网格划分如图4所示。



图 4 模型的网格划分 Fig. 4 Model meshing

接着,通过模态分析,仿真获得周期短路和开路栅阵的禁带边界频率,即对称模式和反对称模式。其中,将电极的电学边界条件 $\Gamma$ +设置为电压  $V_t = 1, \Gamma_-$ 设置为接地,获得周期短路栅阵的禁带 上下边界频率( $f_{s-}, f_{s+}$ );同理,将电极的电学边界 条件 $\Gamma_+$ 设置为电荷 $Q = 0, \Gamma_-$ 设置为接地,获得周 期开路栅阵的禁带上下边界频率( $f_{o-}, f_{o+}$ )。液膜 负载采用厚度为5 nm的甲基膦酸二甲酯(DMMP), 其无液膜负载和有液膜负载时的禁带边界频率如 图 5(a)和图 5(b)所示。利用前面推导的求解 COM 参量的公式,提取出周期结构的 COM 参量(传播速 度 $\nu$ 、耦合系数 $\kappa$ 、激发系数 $\alpha$ )。



图5 液膜负载前后SAW谐振器的禁带边界频率

Fig. 5 Band gap boundary frequencies of SAW resonators before and after liquid film loading

最后,通过静态分析得到静态电容C<sup>[11]</sup>:

$$W_e = \frac{Q^2}{2C\lambda}.$$
 (8)

$$C\lambda = \frac{Q}{V_t}.$$
(9)

当Al电极上施加交变电压V4时,归一化静态 电容 $C_n$ 为

$$C_n = \frac{C\lambda}{W} = \frac{W_e}{(V_t)^2 W}.$$
 (10)

与有液膜负载的周期结构类似,通过有限元方 法分别对有液膜负载和无液膜负载的周期结构进 行建模,模态分析得到禁带边界频率,结合COM 理论,提取出无液膜负载和有液膜负载周期结构的 COM参量。

# 1.3 1-3 模式下的**P**矩阵模型

本文对三换能器的双端对谐振器结构进行理 论和实验分析,它由3个换能器和两侧相同的金属 短路栅阵构成,其结构如图6所示。



三换能器双端对 SAW 谐振器的结构示意图 图6 Fig. 6 Schematic diagram of the three-transducer dual-end pair SAW resonator

为了得到1-3模式结构双端对SAW谐振器的 频率响应,可以将其划分为若干个周期性或准周期 性结构,而每一部分均可用P矩阵来表示,如图7 所示。



图7 1-3模式谐振器的 P矩阵模型 Fig. 7 The  $\boldsymbol{P}$  matrix model of 1-3 mode resonator

#### **P**矩阵元为

$$\begin{cases} P_{11} = \frac{j\kappa^* \sin(DL)}{D\cos(DL) + j\Delta \sin(DL)}, & P_{12} = \frac{(-1)^{2N}D}{D\cos(DL) + j\Delta \sin(DL)}, \\ P_{13} = jL \frac{\sin(DL/2)}{DL/2} \frac{j(\Delta \alpha^* + \kappa^* \alpha) \sin(DL/2) + \alpha^* D\cos(DL/2)}{D\cos(DL) + j\Delta \sin(DL)}, \\ P_{22} = \frac{j\kappa \sin(DL)}{D\cos(DL) + j\Delta \sin(DL)}, \\ P_{23} = (-1)^{2N} jL \frac{\sin(DL/2)}{DL/2} \frac{j(\Delta \alpha + \kappa \alpha^*) \sin(DL/2) + \alpha D\cos(DL/2)}{D\cos(DL) + j\Delta \sin(DL)}, \\ P_{33} = G + jB + j\omega LC, \end{cases}$$
(11)

其中,结构参量 L 为IDT 长度, N 为电极对数,即  $L = N\lambda_0$ , Re 为取实部运算。由式(11) P 矩阵元 的计算公式可知,其由 COM 参量和结构参量决定。 利用有限元方法结合 COM 理论提取出负载前后的 COM 参量代入每一部分的 P 矩阵,用 P 矩阵级联 技术得到 SAW 检测器导纳矩阵 Y,通过网络参量 转换关系得到检测器频率响应。转换关系如式(12) 所示:

$$IL = -20 \lg |S_{12}|$$
  
= 20 lg  $\left| \frac{(Y_{01} + Y_{11}) (Y_{02} + Y_{22}) - Y_{12}Y_{21}}{2Y_{12}\sqrt{Y_{01}Y_{02}}} \right| (dB).$  (12)

# 2 数值结果

图6所示的1-3模式SAW谐振器的结构参数如 表2所示。图3所示的仿真模型中采用的压电、电极 材料分别是ST-X石英压电基片和铝电极,参数分 别如表3、表4所示,液膜负载采用厚度为5 nm的 DMMP、烷烃(C7、C8),材料参数如表5。

#### 表 2 SAW 谐振器结构参数

 Table 2 SAW resonator structure parameters

结构参数	参数值
中间换能器 (IDT2) 的指条对数	60
对称换能器 (IDT1、IDT3) 指条对数	30
两侧反射栅指条对数	100
声孔径 W	$150\lambda_0$

#### 表3 压电石英基片的材料参数

Table 3 Material parameters of piezoelec-tric quartz substrate

材料	密度/	劲度常数/	压电应力常数/	介电常数/
类别	$(\rm kg{\cdot}m^{-3})$	$(10^{10}~{\rm N}{\cdot}{\rm m}^{-2})$	$(C \cdot m^{-2})$	$(10^{-12}~{\rm F}{\cdot}{\rm m}^{-1})$
石英	2651	$c_{11} = 8.674$	$e_{11} = 0.171$	$\varepsilon_{11} = 39.843$
		$c_{12} = 0.699$	$e_{14} = -0.0436$	$\varepsilon_{33} = 40.7284$
		$c_{13} = 1.191$		
		$c_{14} = -1.791$		
		$c_{33} = 10.72$		
		$c_{44} = 5.794$		
		$c_{66} = 3.9875$		

本文采用的 IDT 波长 $\lambda = 6 \mu m$ ,电极宽度  $a = \lambda/4$ ,电极厚度 $h \in [0,550 nm]$ 。基于上述理 论以及参数,通过有限元商业软件建立仿真,结合 COM 理论提取液膜负载前后的 COM 参量,代入 **P**  矩阵,利用 **P**矩阵级联技术计算得到液膜负载前后 中心频率变化量。以指条厚度 h = 300 nm、负载为 DMMP的周期结构为例,提取液膜负载前后检测器 的归一化 COM 参量如表6所示,频率响应如图8所 示,实线和虚线分别表示无液膜负载和有液膜负载 时的频率响应,两个中心频率的差值即为液膜负载 引起的频率偏移。

#### 表4 铝电极的材料参数

Table 4 Material parameters of aluminumelectrode

材料类别	密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	杨氏模量/Pa	泊松比	相对介 电常数
铝(Al)	2700	$70  imes 10^9$	0.33	1

# 表 5 DMMP 和烷烃 (C7、C8) 的材料参数

Table 5Material parameters of DMMPand alkanes (C7, C8)

材料类别	密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	黏度 (25 ℃, mpa.s)
DMMP	1145	1.75
C7	684	0.396
C8	703	0.514

# 表 6 DMMP 负载前后周期结构的 COM 参量 Table 6 COM parameters of periodic structure before and after DMMP load

COM 参量	负载前	负载后
传播速度 $\nu/(m \cdot s^{-1})$	3113.84	3104.58
归一化耦合系数 $\kappa\lambda$	0.0489	0.0559
归一化激发系数 $lpha_n/(\Omega^{-1/2})$	$2.8603\times10^{-5}$	$2.8795\times10^{-5}$
归一化静态电容 $C_n/(\mathrm{F}\cdot\mathrm{m}^{-1})$	$5.2489 \times 10^{-11}$	$5.5324 \times 10^{-11}$

经进一步计算发现,对大多数液体负载而言, 当液体的黏滞系数很低时,其黏滞系数和声波波 速不同对灵敏度的影响很小,可以忽略不记。本节 将选用DMMP和正庚烷(C7)作为模拟液膜负载, 经计算可得指条厚度在h ∈ [0,550 nm]区间内, DMMP、C7液膜负载前后的中心频率变化量,如 图9、图10所示。结果表明,当DMMP冷凝为液膜 作为模拟负载时,SAW检测器的灵敏度随着电极厚 度的增加先变大后减小;当C7冷凝为液膜作为模 拟负载时,SAW检测器的灵敏度随着电极厚度的增 加先增加后减小,再有小幅度的上升,最优归一化电 极厚度为6.4%~7.6%之间。



Fig. 8 Frequency response of SAW resonator before and after liquid membrane loading (h = 300 nm)



图 9 DMMP 液膜引起的中心频率偏移量随电极厚 度变化理论图

Fig. 9 Theoretical diagram of the center frequency shift caused by the DMMP with the electrode thickness

![](_page_6_Figure_7.jpeg)

图 10 C7 液膜引起的中心频率偏移量随电极厚度 变化理论图

Fig. 10 Theoretical diagram of the center frequency shift caused by the C7 with the electrode thickness

# 3 实验部分

为验证上述理论分析,本次实验在ST-X石 英压电表面沉积了6种电极厚度(徕卡DCM8显微 镜干涉测量模式实测值):253.7 nm、297.7 nm、 366.2 nm、389.5 nm、461.9 nm、508.9 nm,制备相应的SAW器件进行了实验。图11为完好的SAW器件。

![](_page_6_Picture_13.jpeg)

图 11 SAW 实验器件 Fig. 11 SAW experimental device

#### 3.1 实验条件

色谱柱的初始温度45 ℃,升温至180 ℃,柱 流量3 mL/min; 进样口温度200 ℃; 六通阀温度 165 ℃; 检测器温度40 ℃; 氦气作载气; 泵吸时间 40 s,实验装置如图12 所示。

实验样品: 质量浓度为0.0016 mg/mL的 DMMP溶液;体积浓度为3×10<sup>-6</sup>浓度的C7;体积 浓度为1.5×10<sup>-6</sup>浓度的C8。

#### 3.2 结果与讨论

为了避免特殊性,减少单次测量的误差,采用每个器件测6组数据、多次实验结果取平均值的方法。上述6种电极厚度的SAW检测器在本课题组自行研制的GC/SAW系统中进行DMMP、C7、C8响应实验,实验结果如图13、图14、图15所示。从图中可以看出,当DMMP为实验样品时,灵敏度随电

极厚度变化趋势是先升高后下降,最优电极厚度在 6.4%~7.6%之间;当C7、C8为实验样品时,灵敏度 随电极厚度变化趋势是先升高后下降,再小幅度的 升高,最优电极厚度在6.4%~7.6%之间。从中可以 看出实验和理论中器件灵敏度随叉指厚度的变化 趋势吻合良好,这也验证了前面的理论分析。

![](_page_7_Picture_2.jpeg)

图 12 实验平台 Fig. 12 Experimental platform

![](_page_7_Figure_4.jpeg)

图 13 0.0016 mg/mL DMMP 引起的响应值随电 极厚度变化实验图

Fig. 13 The experimental graph of the response caused by 0.0016 mg/mL of DMMP with electrode thickness

![](_page_7_Figure_7.jpeg)

图 14  $3 \times 10^{-6}$  C7 引起的响应值随电极厚度变化 实验图

Fig. 14 The experimental graph of the response caused by  $3 \times 10^{-6}$  of C7 with electrode thickness

![](_page_7_Figure_10.jpeg)

图 15 1.5 × 10<sup>-6</sup> C8 引起的响应值随电极厚度变 化实验图

Fig. 15 The experimental graph of the response caused by  $1.5\times10^{-6}$  of C8 with electrode thickness

#### 4 结论

本文分析了当负载为液态时,谐振器指条厚 度对SAW传感器灵敏度的影响。利用有限元商业 软件建立流固耦合理论和压电耦合相结合的有液 膜负载的仿真模型,结合COM模型及**P**矩阵级 联技术,理论计算了SAW器件灵敏度随指条厚度 的变化曲线;开展了DMMP、C7、C8 作为实验样 品的响应实验测试,发现实验获得的变化曲线与 理论分析得到的变化曲线大致相符合,最优归一 化电极厚度为6.4%~7.6%之间。以0.0016 mg/mL DMMP液膜负载为例,根据实验结果,指条厚度 h = 461.9 nm时灵敏度最高(取均值为1685 Hz), 指条厚度h = 253.7 nm时灵敏度最低(取均值为 648 Hz),灵敏度提升了1.6倍。该研究为GC/SAW 系统中SAW检测器的优化设计提供了依据。

参考文献

- Ballantine R D S, White R M, Matin S J, et al. Acoustic wave sensors[M]. San Diego: Academic Press, 1997.
- [2] 何世堂,王文,刘久玲,等. 声表面波气体传感器研究进展 [J]. 应用声学, 2013, 32(3): 252-262.
  He Shitang, Wang Wen, Liu Jiuling, et al. Research progress of surface acoustic wave based gas sensors[J]. Journal of Applied Acoustics, 2013, 32(3): 252-262.
- [3] Watson G, Staples E, Horton W. Gas chromatography utilizing SAW sensors[C]// IEEE Ultrasonics Symposium. IEEE, 1991.
- [4] McGill R A, Nguyen V K, Chung R, et al. The 'NRL-SAWRHINO': a nose for toxic gases[J]. Sensors & Actuators B Chemical, 2000, 65(1): 10–13.
- [5] 郭希山, 吴坚, 王立人. 基于气液相转变效应的 SAW 气体传 感器 [J]. 浙江大学学报 (工学版), 2007, 41(3): 673-678.
  Guo Xishan, Wu Jian, Wang Liren. Surface acoustic wave gas sensors based on gas-liquid phase transition ef-

fect[J]. Journal of Zhejiang University(Engineering Science), 2007, 41(3): 673–678.

[6] 郭希山, 童基均, 陈裕泉, 等. 基于 SAW 表面气液相效应和 GC 分离柱的气敏传感器 [J]. 传感技术学报, 2006, 19(1): 318-322.

Guo Xishan, Tong Jijun, Chen Yuquan, et al. Surface acoustic wave gas sensors integrated GC separation column based on gas-liquid phase transition[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2006, 19(1): 318–322.

- [7] Liu J, Wang W, Li S, et al. Advances in SAW gas sensors based on condensate-adsorption effect[J]. Sensors, 2011, 11(10): 11871–11884.
- [8] 刘久玲,郝文昌,刘明华,等.谐振式检测器谐振腔对声表 面波气相色谱仪灵敏度的影响[J].声学学报,2018,43(4): 803-809.

Liu Jiuling, Hao Wenchang, Liu Minghua, et al. Influence of resonant cavity of a resonance detector on the sensitivity of a surface acoustic wave gas chromatograph gas sensor system[J]. Acta Acustica, 2018, 43(4): 803–809.

- [9] Hao W, Liu J, Liu M, et al. Mass sensitivity optimization of a surface acoustic wave sensor incorporating a resonator configuration[J]. Sensors, 2016, 16(3): 562.
- [10] 王剑, 安燕, 刘明华, 等. 退火温度对声表面波检测器电极表 面粗糙度的影响 [J]. 应用声学, 2019, 38(1): 133–137.

Wang Jian, An Yan, Liu Minghua, et al. The effect of annealing temperatures on electrode surface roughness of the surface acoustic wave detectors[J]. Journal of Applied Acoustics, 2019, 38(1): 133–137.

[11] 郝文昌,王藉秋,刘久玲,等.谐振式检测器指条厚度对质量型声表面波传感器灵敏度的影响[J].声学学报,2019,44(2): 385-392.

Hao Wenchang, Wang Jiqiu, Liu Jiuling, et al. Influence of electrode thickness of a resonance detector on the sensitivity of a mass-loading surface acoustic wave sensor[J]. Acta Acustica, 2019, 44(2): 385–392.

- [12] 何世堂,刘久玲,刘明华,等. 声表面波气相色谱仪及其应用[J].应用声学,2018,37(1):1-7.
  He Shitang, Liu Jiuling, Liu Minghua, et al. Surface acoustic wave gas chromatography and its application [J]. Journal of Applied Acoustics, 2018, 37(1):1-7.
- [13] Farnell G W. Symmetry considerations for elastic layer modes propagating in anisotropic piezoelectric crystals[J]. Ultrasonics, 1971, 9(1): 125.
- [14] 章梓雄,董曾南. 粘性流体力学 [M]. 北京:清华大学出版社, 1998.
- [15] 王昊. 声表面波器件的快速精确模拟研究 [D]. 南京: 南京大 学, 2013.