

# 基于延迟线理论的无源声表面波气体传感器

张昊, 罗文广, 于滢源, 曹莹

(广西工学院 电子信息与控制工程系, 广西 柳州 545006)

**摘要:**针对单输入、单输出及双输入、双输出换能器构成的声表面波(SAW)气体传感器存在的缺陷,研究一种无线无源、温度可测的气体传感器。基于声表面波的延迟线理论,利用叉指换能器的转换能量原理,对叉指换能器及反射器进行合理布局,并使3个反射器之间互为参考反射器,获得一种新型的声表面波气体传感器。该设计减少了传感器中信号间及环境温度等因素对测量的干扰,提高了传感器的灵敏度和测量准确度。该传感器具有结构简单、无线无源等特点,适合在不直接接触的复杂工程环境下工作。

**关键词:**声表面波;无源气体传感器;温度传感器;叉指换能器;延迟线理论

**中图分类号:**TN65;TP212 **文献标识码:**A

## Study of Passive Surface Acoustic Wave Gas Sensors Based on the Delay Line Theory

ZHANG Hao, LUO Wenguang, YU Yingyuan, CAO Ying

(Dept. of Electronic Information & Control Engineering, Guangxi University of Technology, Liuzhou 545006, China)

**Abstract:** In view of some shortcomings existing in the surface acoustic wave gas sensor composed of the single input-output and the double input-output transducers, a type of wireless and passive gas sensor that can also measure temperature was studied. The sensor was designed by applying the transition energy principle of inter digital transducers to set up a rational layout of inter digital transducers and reflectors based on the surface acoustic wave delay line theory, and taking the three reflectors as reflecting reference each other. The proposed scheme can reduce the effect of the interior signals of sensor and the environment temperature on the signal measurement, and enhance the sensor sensitivity and measurement accuracy. The sensor has characteristics such as simple structure, wireless and passive, suitable for working in complex engineering environment unsuited for contacting.

**Key words:** surface acoustic wave (SAW); passive gas sensors; temperature sensor; inter digital transducer (IDT); delay line theory

### 0 引言

气体检测的主要方法有物理法<sup>[1]</sup>和化学法<sup>[2]</sup>,这些方法所使用的设备和测量系统通常较昂贵和复杂,因此,用各种体积小且价格低的物理器件来实现气体浓度及特定气体种类的测量和检测<sup>[3-4]</sup>是科技人员努力研究的方向。其中,用可靠性高,体积小,敏感性和重复性好的声表面波(SAW)器件构成的气体传感器为各种气体检测提供了一条新的途径<sup>[4]</sup>。通常,单输入、单输出换能器构成单声路SAW气体传感器<sup>[5]</sup>,而双输入、双输出换能器<sup>[6-7]</sup>构

成双声路SAW气体传感器。双声路与单声路相比,可有效抑制由于温度等环境因素改变引起的干扰问题<sup>[8]</sup>,提高测量信号的准确性,但增加了传感器的体积和电路设计的复杂性,且不能对环境的温度进行有效检测。

针对以上问题,本文以SAW延迟线理论为基础,结合SAW温度传感器设计方法,并根据叉指换能器(IDT)的工作原理,设计了一种可同时测量温度,并能实现无线无源方式的新型SAW气体传感器。

收稿日期:2011-06-26

作者简介:张昊(1984-),男,河南商水人,硕士生,主要从事智能控制与智能自动化的研究。E-mail:haozz8408@yahoo.com.cn。通信作者:罗文广(1967-),男,湖南衡东人,教授,工学硕士,主要从事智能控制及应用、汽车电子控制技术等的研究。E-mail:lwgl68@126.com。

## 1 无线无源 SAW 气体传感器结构设计

基于 SAW 延迟线理论的无线无源气体传感器核心部件是由压电基底和在其表面的 SAW 延迟线两部分组成,其中 SAW 延迟线是由若干反射器和 IDT 组成。SAW 传感器内部无需电源来提供工作时所需的能量,而是通过天线接收的收发机发射的射频(RF)脉冲信号提供传感器的工作能量。射频信号被传感器的天线接收后,由 IDT 经逆压电效应转换成 SAW 信号在基底表面传播,反射器将 SAW 信号反射。反射信号再通过 IDT 的压电效应转换成电信号,并通过与 IDT 连接的天线转换为 RF 脉冲回波信号<sup>[9]</sup>。由于传感器基底材料的几何参数会因所检测气体浓度和外界温度的影响发生变化,因此在 RF 脉冲回波信号中包含了待测气体浓度及温度的信息。回波信号由接收机接收后,通过数据处理,将包含在信号里的各种信息提取出来,从而得到待测物理量。

图 1 为 SAW 传感器的结构示意图。IDT 位于基底上表面的中部,通过天线与外界相连。 $R_1$ 、 $R_2$  和  $R_3$  为反射器,分别位于 IDT 的两侧并处于 SAW 传播路径上。传感器中的 IDT 接收电信号后,在垂直于 IDT 的左右两个方向上产生 SAW,且两个方向上传输信号的能量相等。在设计时将 3 个反射器分布于 IDT 的两侧,可使 SAW 信号的能量得到充分利用,并减少了反射器之间的相互干扰<sup>[10]</sup>。由图可知, $S_1$ 、 $S_2$  和  $S_3$  分别为相对应反射器与 IDT 之间的区域,其中  $S_1$ 、 $S_2$  和  $S_3$  具有不同的大小和尺寸。在设计中  $S_1$  和  $S_3$  区域为裸露状态,不加入任何覆盖层,用来检测温度的大小; $S_2$  区域涂覆选择性高分子吸附膜材料,用来检测气体浓度。

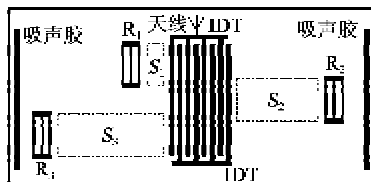


图 1 无线无源 SAW 气体传感器结构图

当 SAW 传感器处于被测环境中时,外界的温度和所测气体浓度将作用于整个基底,因此基底表面的 SAW 传输特性会因被测环境的变化发生相应改变。但在实际测量的过程中,RF 反射信号除受到温度和气体浓度的影响外,还会受到所测环境其他因素的影响,且 RF 信号空间传输距离变化也会

对测量结果的准确性产生影响。因此在传感器中设计了参考反射器,其中  $R_1$ 、 $R_3$  互为参考反射器,可消除环境中其他因素和 RF 信号空间传输部分所产生的误差,进而准确地测量温度值。在气体浓度的测量过程中环境温度对选择性高分子吸附膜材料造成不可忽略的影响,因此,将  $R_3$  作为  $R_2$  的参考反射器,从而消除温度和其他环境因素、RF 信号空间传输部分所产生的误差,得到精确测量值。

## 2 新型传感器的理论分析

经系统天线发出的初始射频信号的表达式为

$$S(t) = A \cos[\theta(t)] = A \cos[(\omega_0 + \mu t/2)t + \theta_0] \quad (1)$$

式中: $\omega_0$  为 FM 信号的初始频率值; $\mu$  为  $2\pi s$  的整数倍; $t$  为时间; $\theta_0$  和  $A$  分别为信号的初始相位和初始幅值。相对  $S(t)$  的回波信号经混频器和滤波器后的响应

$$I_i(t) = B_i \cos[\theta(t) - \theta_i(t)] = B_i \cos(\mu t_i t + \omega_0 t_i - \mu_i t_i^2 / 2) \quad (i=1,2,3) \quad (2)$$

式中: $B_i$  为检测到的经第  $i$  个反射器返回的回波信号的幅值; $t_i$  为第  $i$  个反射器反射的回波 RF 脉冲信号相对于初始信号的时间延迟。频率  $\mu t_i$  和相移  $\varphi_i = \omega_0 t_i - \mu_i t_i^2 / 2$  均和  $t_i$  有关。因为  $\omega_0$  在一般情况下大于  $\mu t_i$ ,所以,相移比频率变化更敏感。每个反射器反射的回波信号均具有特定相移值,且相移值  $\varphi_i$  的变化与  $t_i$  相关,即与所测量环境变化相对应。

### 2.1 SAW 传感器温度的测量原理

由于所设计的无线无源 SAW 传感器中  $R_1$  和  $R_3$  与 IDT 之间为裸露状态,无覆盖层,所以只对温度的变化敏感。反射器与 IDT 之间的绝对距离会随温度的变化而发生改变,因此回波信号在  $t_i$  上造成了差异,也就使被测信号的相移发生改变,从而可精确地测出温度的变化并得到准确的温度值。两个反射器的相移差可表达为

$$\begin{cases} \varphi_3 - \varphi_1 = (\varphi_3 - \varphi_1) = [\omega_0 - \mu/2(t_3 + t_1)] \cdot \\ (t_3 - t_1) = K\tau \\ \tau = \tau_0 [1 + \alpha(T - T_0)] \end{cases} \quad (3)$$

式中: $\tau_0$  为表面波从  $R_1$  传播至  $R_3$ ,再返回的总的传播时间; $\alpha$  为 SAW 器件时间延迟的温度系数; $T_0$  为环境温度。式(3)可变换为

$$\varphi_3 - \varphi_1 = K\tau_0 [1 + \alpha(T - T_0)] = a(T - T_0) + b \quad (4)$$

式中: $a = K\alpha\tau_0$ ;  $b = K\tau_0$ 。

因此,温度的变化值为

$$\Delta T = (T - T_0) \approx \varphi_{31} / a \quad (5)$$

式中  $a$  为已知,  $\varphi_{31}$  可通过测量得到,如对于 905 MHz 的信号,测得的相移变化是  $1^\circ$  时,对应的温度变化为  $0.33^\circ\text{C}$ ,故可计算出相应温度的变化值。

### 2.2 SAW 传感器气体浓度的测量原理

在 IDT 与反射器之间涂覆选择性高分子吸附膜材料,当敏感气体通过时,吸附膜通过物理吸附和配位吸附将敏感气体分子束缚在膜表面,敏感气体分子的加入使敏感膜单位面积的质量增大,质量负载效应降低了 SAW 的声速,声速的变化引起频率和相移的变化,由于声速受到环境影响所发生的改变很小,所以相移的变化比频率更敏感。通过测试传感器相移的变化就可测出敏感气体的浓度<sup>[12]</sup>。

将  $S_2$  区域间涂上敏感的聚合物膜,通过该区域的 SAW 相移的表达式为

$$\varphi_2 = 2\pi f_0 \Delta\tau = 2\pi f_0 \times 2d_2 / v_0 \times (\Delta v / v_0) \quad (6)$$

式中:  $f_0$  为中心频率;  $\Delta\tau$  为延时时间;  $d_2$  为第 2 个  $R_2$  与 IDT 间的距离;  $v_0$  为未受环境影响时的声速;  $\Delta v$  为声速的改变值。

由于温度等外界环境的变化同样使相位发生变化,在方程中包含了这些信息,可用不同的方法进行补偿<sup>[11]</sup>。在恒定的温度下且不通入被测气体时,  $R_2$ 、 $R_3$  与 IDT 之间的相移分别为

$$\varphi_{T_2} = 2\pi f_0 d_2 / v_0 (T - T_{ref}) = 2\pi f \times \Delta\tau_{T_2} \quad (7)$$

$$\varphi_{T_3} = 2\pi f_0 d_3 / v_0 (T - T_{ref}) = 2\pi f \times \Delta\tau_{T_3} \quad (8)$$

由式(7)、(8)可得

$$\varphi_{T_2} = \omega \times \varphi_{T_3} \quad (9)$$

式中:  $T_{ref}$  为参考温度;  $\Delta\tau_{T_2}$  为  $R_2$  处温度  $T_2$  影响下  $R_2$  与 IDT 之间的延迟时间;  $\Delta\tau_{T_3}$  为  $R_3$  处温度  $T_3$  影响下  $R_3$  与 IDT 之间的延迟时间;  $d_2$  为  $R_2$  和 IDT 之间的距离;  $\omega$  为  $R_2$ 、 $R_3$  分别与 IDT 之间距离的比率。

在给定温度和注入气体的情况下,  $R_2$  与 IDT 之间的相移包含了气体浓度和温度信息:

$$\varphi_2 = \varphi_{\varphi_2} + \varphi_{T_2} \quad (10)$$

式中  $\Delta\varphi_{\varphi_2}$  为由于气体浓度改变产生相移,因此,使用差分法引入式(9),温度成分可抵消,剩下气体信息为

$$\varphi_{\varphi_2} = \varphi_2 - \omega \cdot \varphi_{T_3} \quad (11)$$

以上推导在理论上阐述了温度和气体浓度两个

物理参数的测量原理,为实际传感器的设计和测量奠定了理论基础。

### 3 仿真分析

应用 Coventor Ware 软件对该传感器进行仿真分析,来检测此传感器的预期测量效果。在仿真过程中,温度的变化范围为  $25 \sim 90^\circ\text{C}$ ,  $\text{CO}_2$  气体的浓度范围为  $(50 \sim 350) \times 10^{-6} \text{ kg/mL}$ <sup>[12]</sup>。由于上述的理论推导是针对平均温度应变和平均气体浓度应变进行分析的,应变可由相应的相移变化表示,因此仿真计算利用在传播路径上 SAW 相移的改变来表示温度和气体浓度的变化。

SAW 传感器相移随温度变化的关系如图 2 所示。由图可见,随着温度的升高相移呈近似线性变化,符合相移与温度关系(见式(5))。通过最小均方法计算,从图中近似直线得到倾斜系数与理论计算值基本一致,从而说明这种新型传感器对温度值检测的准确性。

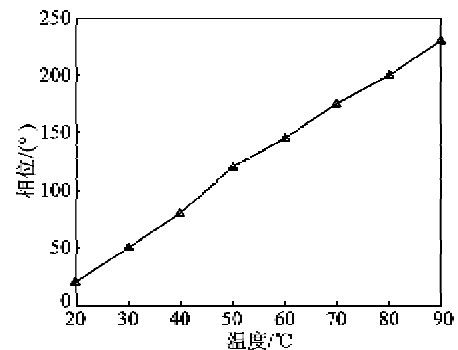


图 2 SAW 传感器相移与温度的关系

在 1 个大气压、 $25^\circ\text{C}$  条件下,对  $\text{CO}_2$  气体浓度进行仿真计算,结果如图 3 所示。该图表明其相移随着气体浓度变化呈近似线性变化,体现了传感器结构的设计具有良好的信噪比系数和较低的损耗。

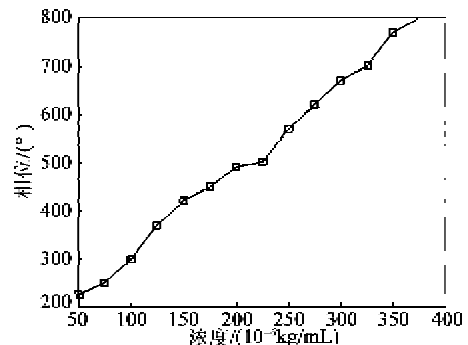


图 3 恒温时 SAW 传感器相移与气体浓度的关系

图 4 为在无参考反射器的情况下,在不同环境温度时,SAW 传感器相移随气体浓度变化的情况。

由图可知,不同的环境温度下,相移的变化较大,表明环境温度对气体浓度的测量有较大影响。

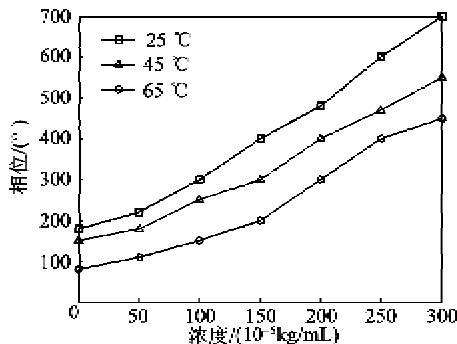


图4 无参考反射器时温度和气体浓度对传感器相移的影响

图5为用 $R_3$ 作为参考时(即利用其声路来进行温度补偿),在以上3种环境温度下SAW传感器相移随气体浓度变化的情况。由图可见,3种环境温度下的曲线几乎重合,表明设计的SAW传感器已消除了环境温度对气体浓度测量产生的影响,其测量准确度提高。

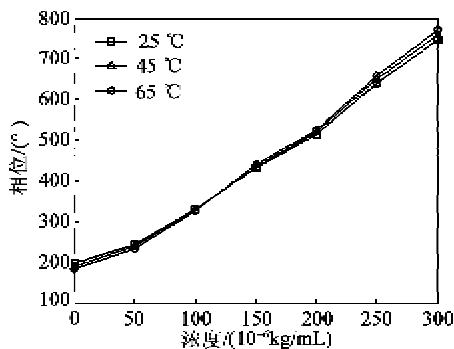


图5 有参考反射器时温度和气体浓度对传感器相位的影响

#### 4 结束语

本文设计了一种新型可测温度和气体浓度的无线无源SAW传感器的结构,对其进行了理论分析,并进行了仿真计算。为了减少信号间的干扰,将3个反射器所产生的声路互为参考,从而得到精确的温度值,并在气体浓度的测量中有效消除环境温度对测量引起的影响,得到准确的测量值。理论分析和仿真计算表明这种设计方法是可行的。

#### 参考文献:

[1] KENDLER S, RE IDY S M, LAMBERTUS G R, et al. Ultrafast gas chromatographic separation of organophosphor and organ sulfur compounds utilizing a micro counter current flame photometric detector[J]. Anal Chem, 2006, 78(19):6765-6773.

- [2] KUWATA S, SADAOKA Y. Detection of gaseous hydrogen peroxide using planar type amperometric cell at room temperature[J]. Sensors and Actuators Chemical, 2000, 85(123):325-328.
- [3] TANAKA Y, NAKAMOTO T, MORIZUMI T, et al. Study of highly sensitive smell sensing system using gas detector tube combined with optical sensor[J]. Sensors and Actuators Chemical, 2006, 119(1):84-88.
- [4] AVRAMOV D, VOIGT A, RAPP M. Rayleigh SAW resonators using gold electrode structure for gas sensor applications in chemically reactive environments[J]. Electronics Letters, 2005, 41(7):450-452.
- [5] 杨楷, 李志刚, 景玉鹏, 等. 声表面波气体传感器的研究进展[J]. 电子元件与材料, 2008, 27(9):26-30.
- YANG Kai, LI Zhigang, JING Yupeng, et al. Research progress of SAW gas sensors[J]. Electronic Components and Materials, 2008, 27(9):26-30.
- [6] 李淑红, 赵启大, 廖继平, 等. 声表面波气体传感器的检测优化设计[J]. 压电与声光, 2010, 32(6):912-914.
- LI Shuhong, ZHAO Qida, JIAO Jiping, et al. Detecting optimal design of surface acoustic wave gas sensor[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2010, 32(6):912-914.
- [7] 文常保, 朱长纯, 刘君华, 等. 基于多条耦合器的双声路声表面波气体传感器[J]. 仪器仪表学报, 2008, 29(12):2545-2547.
- WEN Changbao, ZHU Changchun, LIU Junhua, et al. Dual track surface acoustic wave gas sensor based on multistrip coupler[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2008, 29(12):2543-2547.
- [8] 张朋, 陈明, 何鹏举. 声表面波CO气体传感器温度误差补偿方法研究[J]. 压电与声光, 2010, 32(1):3-6.
- ZHANG Peng, CHEN Ming, HE Pengju. Study on temperature compensation method in SAW CO gas sensors[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2010, 32(1):3-6.
- [9] 范茂军, 鲁德双, 刘光辉, 等. 微传感器MEMS与智能器件[M]. 北京:中国计量出版社, 2007:339-342.
- [10] 李天利, 吴正斌, 胡泓, 等. 一种可同时测量温度和压力的新型SAW传感器[J]. 纳米技术与精密工程, 2009(6):563-568.
- LI Tianli, WU Zhengbin, HU Hong, et al. A novel SAW sensor for temperature and pressure measurement[J]. Nanotechnology and Precision Engineering, 2009(6):563-568.
- [11] 廖继平. 声表面波气体传感器的实验设计与研究[D]. 天津:南开大学, 2009:15-21.
- [12] WANG W, LEE K, KIM T, et al. A novel wireless passive CO<sub>2</sub> sensor incorporating a surface acoustic wave reflective delay line[J]. Smart Mater Struct, 2007, 16:1382-1389.