

一种新型的无源无线 SAW 温度传感器的研究

巩凡¹, 宋倩倩², 陈开鑫²

(1. 国网日照供电公司, 山东日照 276800; 2. 电子科技大学 通信与信息工程学院, 四川成都 611731)

摘要: 该文介绍了一种新型的无源无线声表面波温度传感器, 传感器的能量来自外界的无线电磁波。通过利用多条耦合器及位于不同声路的两条反射栅, 实现了在消除体声波(BAW)干扰的同时, 利用两条声表面波(SAW)传输路径差引入相应的声传播延迟, 用以提高测温精度。该声表面波温度传感器可采用小波函数包络加权叉指换能器, 从而抑制了频率响应曲线中的旁瓣, 提高了品质因数。此外, 通过使用一个叉指换能器的单端输入、单端输出的结构, 可有效减小传感器的体积, 使其具有广泛的应用范围。

关键词: 温度传感器; 声表面波; 小波函数包络加权; 叉指换能器; 反射栅

中图分类号: TN65 **文献标识码:** A

Study on a Novel Passive Wireless SAW Temperature Sensor

GONG Fan¹, SONG Qianqian², CHEN Kaixin²

(1. Rizhao Power Supply Company, State Grid Corporation of China, Rizhao 276800, China; 2. School of Communication and Information Engineering, University of Electronics Science and Technology of China, Chengdu 611731, China)

Abstract: A Novel passive wireless surface acoustic wave (SAW) temperature sensor is presented in this paper. The sensor energy comes from the wireless electromagnetic waves at the outside world. A multi-strip coupler and two reflectors located different tracks are used. The former can eliminate the disturbance from bulk acoustic wave (BAW), while the latter can improve the accuracy of the temperature measurement by introducing a delay between the two SAW propagation tracks. In addition, the IDT with wavelet envelope weight is used to suppress the side-lobe of the frequency response curve and improve the quality factor. Meanwhile, the transducer structure with the single-ended input and single-ended output is also used to reduce the size of the sensor effectively and enlarge the applying scope.

Key words: temperature sensor; surface acoustic wave; wavelet envelope weighted function; IDT; reflecting grating

0 引言

温度检测作为重要的信息来源, 无论是航天卫星上安装的温度检测仪器, 还是医院中用于检测病人体温的测量计, 都是通过温度传感器采集温度信息。温度传感器也是智能电网不可或缺的一部分。如何设计体积小、成本低、可靠的无源无线温度传感器成为了一种难题。声表面波(SAW)是一种在弹性体表面及其附近传播, 能量集中在表面附近, 且幅值随着深度的增加而迅速减弱的弹性波^[1-3], SAW技术的发展开创了无源无线小型传感器的新纪元。

针对现有温度传感器精度低, 抗干扰能力弱, 可

靠性差, 体积大, 不利于集成化和批量生产的问题, 需要提供一种体积小, 测量精度高, 便于集成化的无源无线 SAW 温度传感器。近年来, 无源无线 SAW 温度传感器的研究得到迅猛发展, 它具有普通传感器没有的优点, 特别适用于一些难以接触的特定环境下的遥测和传感^[4-6]。

本文介绍了一种新型的无源无线 SAW 温度传感器, 它主要由压电材料、反射栅和叉指换能器(IDT)等组成。不同于通常的结构, 本文建议的 SAW 温度传感器首先采用多条耦合器(MSC)将 SAW 信号与体声波(BAW)信号分离到不同的声学轨道, 抑制了造成假响应信号的 BAW。其次, 该温

度传感器具有 2 个位于不同声路的反射栅,从而可在 2 个声路间引入信号延迟,通过测量这一延迟可提升对温度的测量精度。需要指出的是,我们建议的结构中,2 个反射栅位于不同的声路,这样可有效避免 2 个反射栅之间的相互影响,提升器件性能;此外,为提高频率响应,且抑制频率响应曲线中的旁瓣,提高品质因数,该传感器可采用小波函数包络加权的 IDT。最后,通过使用 1 个 IDT 的单端输入、输出结构,可有效减小传感器的体积,使其具有广泛的应用范围。

1 SAW 温度传感器的工作原理

本文建议的新型无源无线 SAW 温度传感器的结构如图 1 所示。它由制作于压电材料基底上的 IDT、位于不同声路的 2 条反射栅、MSC 及吸声材料组成。

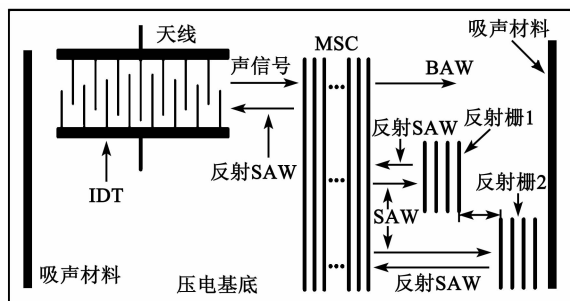


图 1 新型无源无线 SAW 温度传感器结构示意图

由于 IDT 激发的 SAW 信号是 IDT 每对叉指电极产生的声波信号的迭加,且每对叉指电极所激发的 SAW 信号的强度与其重叠长度成正比,故其激发的波也是按照电极在空间上的位置先后排列;重叠长度长的叉指电极所激发的声波信号的振幅大,重叠长度短的叉指电极所激发的声波信号的振幅小。IDT 激发的 SAW 的波束宽度由声孔径决定,即 SAW 只会在声孔径的范围内产生。因此,采用小波函数包络加权 IDT 能增加对频率响应曲线中旁瓣的抑制效果。

该器件基于延迟特性的原理,通过将反射栅反射回的 SAW 转化为电信号,并经过天线发送出去的方式来实现传感,只利用一个 IDT 完成电能与声能的相互转换。延迟型 SAW 传感器的反射栅只在单侧出现,在基片两侧的边缘涂覆吸声材料,可减少声波在基片边缘的反射。

当激励电磁波信号经由天线加载到 IDT 上,电信号通过 IDT 进行声电转换,成为声信号,激励的

声信号向 IDT 的两边扩散。这个声信号包括在压电晶体内部传播的 BAW 和在晶体表面沿左、右两个方向传播的 SAW 两部分。BAW 信号的中心频率远大于激励的 SAW 信号的中心频率,所以,BAW 信号会在频率响应曲线的右侧产生一个假响应曲线,给测量信号造成一定的干扰。为了提高实际应用中的 SAW 器件的效率和器件的频率响应特性,需要减小 BAW,在 IDT 和反射栅之间制作 MSC 可以有效抑制 BAW 的干扰。MSC 是沉积在压电基片上的平行金属条阵列,它可将声功率从一个声学轨道转移到另一个轨道,合理设计金属条数几乎可达 100% 的功率转换而只有很小的结构损耗。IDT 激发的 SAW,从一条声路传到 MSC 左侧并入射到 MSC 的上半部分时,由于正压电效应通过 MSC 的金属膜条将声能转换成电能,并将此电能传导到 MSC 的另一部分;然后,逆压电效应又将电能转换成声能,在预定的轨道向预定的方向传播,由于改变了 SAW 的传播声路,很大程度地抑制了 BAW 和 3 次行程信号。

沿压电材料表面向左端传播的 SAW,被吸声材料吸收,防止了基底边缘的反射对器件造成干扰。沿压电材料向右端传播的 SAW 传播至 MSC 处, MSC 将上声路的 SAW 信号完全转移到下声路输出,但不改变原声路中 BAW 信号传播方向和路线,BAW 传播至衬底边缘处,被吸声材料吸收,实现了将 SAW 和 BAW 信号分离。传播至下声路处的 SAW 信号分别到达位于不同声路的反射栅 1、2,然后被反射回来。当外界的温度变化时,SAW 的传播速度、反射栅的间距等参数会随之变化,从而导致两反射栅反射回来的 SAW 相位差值发生变化,相位差值的变化量可作为温度参数的度量。不同于传统的测量发射信号与反射信号的时间差方式,这一方式测量的是两路反射信号间的相位差,从而将微小的时延变化转变为较易检测的相位变化,降低了测量难度。该结构通过采用两错开位置的反射栅将两声路分离,避免了两声路间的相互干扰,最终可有效提高测量精度。

2 器件结构参数分析

根据器件结构,小波加权 IDT 所激发的波形和叉指电极的空间排列相对应,且周期相同,故要实现一个预期的频率响应特性,只要 IDT 的电极包络设

计与对应的响应函数包络一致即可^[7]。小波加权的窗函数采用汉明窗(Hamming窗),汉明窗加权的系数使旁瓣达到更小,其时域形式^[8-9]为

$$\omega(n) = \left(0.54 - 0.46\cos\frac{2\pi n}{N-1}\right)R_N(n) \quad (1)$$

其中

$$R_N(n) = \begin{cases} 1 & 0 \leq n \leq N-1 \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (2)$$

式中 N 为汉明窗的长度。

小波包络 IDT 完成电磁波信号和声信号之间的相互交换,SAW 信号的波长由 IDT 的指宽 a 和指间距 b 决定^[10]:

$$\lambda = 2(a+b) \quad (3)$$

则小波包络 IDT 的工作频率 f 为

$$f = \frac{v}{\lambda} = \frac{v}{2(a+b)} \quad (4)$$

当基底材料已知,即 SAW 的波速 v 已知时,根据传感器的设计要求所需要的 f ,由式(4)可求出 IDT 的 a 、 b 。为了制作方便,一般情况下,有

$$a = b = \frac{v}{4f} \quad (5)$$

典型的 SAW 传感器工作频率在 25 ~ 500 MHz^[11]。结合文献[4],取 $f = 433$ MHz,常温下, $v = 3159$ m/s,此时, $a = b = 1.8 \mu\text{m}$, $\lambda = 7.2 \mu\text{m}$ 。

器件的声反射栅用来反射 SAW 信号,其结构比 IDT 简单,完整的声反射栅由几个或几十个反射栅条组成。这是因为单个反射栅条不能完全反射 SAW 信号,所以,反射栅条以一定的间距 d_1 组成阵列,反射栅的孔径基本与 IDT 的最大孔径一致或稍大^[12]。一般情况下,指条宽度和指条间距是相等的,每个指条的周期是产生 SAW 的 IDT 指条周期的一半。为满足每个栅条反射信号相位的准确性, d_1 要满足

$$2d_1 = m\lambda \quad m = 1, 2, 3, \dots \quad (6)$$

MSC 是该结构中的关键单元之一,设计时重点考虑其对 SAW 的转换效率,具体设计工作可参考 F. G. Marshall 和 E. G. S. Paige 等的研究^[13-16]进行。

3 SAW 温度传感器的温度性能分析

假设激励信号由 IDT 传播到反射栅 1、2,再经 2 个反射栅反射回 IDT 的时间差为 τ_{21} ,与此相对应的相位差为 φ_{21} ,有

$$\tau_{21} = \frac{2d}{v} \quad (7)$$

式中 d 为反射栅 1、2 的间距。 d 、 v 根据温度的变化而变化。无色散延迟线型 SAW 传感器回波信号的相位变化与时延有关^[17],故相位差与时延的关系为

$$\varphi_{21} = 2\pi f\tau_{21} \quad (8)$$

τ_{21} 的变化量为 $\Delta\tau_{21}$:

$$\Delta\tau_{21} = \tau_{21} - \tau_{210} \quad (9)$$

式中 τ_{210} 为初始状态下,经反射栅 1、2 反射的信号到达 IDT 的时间差。

相位差的变化量 $\Delta\varphi_{21}$ 为

$$\Delta\varphi_{21} = 2\pi f\Delta\tau_{21} \quad (10)$$

由于时延变化微小,对回波信号的时域采样测量误差大,成本高。根据时延和相位之间的关系,可利用对相位的测量来取代对时延的测量。相比检测时延变化,利用相位检测方法更易实现,且准确性高。

由式(7)可知, τ_{21} 的温度系数为

$$\frac{\Delta\tau_{21}}{\tau_{210}} = \left[\left(\frac{2d}{v}\right)^{-1} \frac{2\Delta d}{\Delta T} - \frac{1}{v} \frac{\Delta v}{\Delta T} \right] \Delta T = T_{\text{CD}} \cdot \Delta T \quad (11)$$

式中 T_{CD} 为延迟温度系数,它仅取决于压电材料的晶体结构和切向。

根据式(10)、(11)可得 $\Delta\varphi_{21}$ 为

$$\Delta\varphi_{21} = 360^\circ \cdot f \cdot T_{\text{CD}} \cdot \Delta T \quad (12)$$

由式(12)可知,对于给定的材料与工作频率,仅由 τ_{210} 与 ΔT 决定。为提高相位差的灵敏度,应增加 d ,但这会在一定程度下增加插入损耗,减小作用距离,因此,需要综合考虑选择合适的 d 及反射栅的位置。

4 结束语

本文介绍了一种新型的无源无线温度传感器,小波函数包络加权的 IDT 能提高频率响应,抑制频率响应曲线中的旁瓣,提高品质因数。使用 1 个 IDT 的单端输入、输出结构,有效地减小了传感器的体积。IDT 除了激发 SAW 外,同时还能激发 BAW, MSC 可对造成假响应信号的 BAW 进行抑制,提高了测温精度。该器件性能稳定,体积小,便于集成化,准确度高,实用性好,具有实际的应用价值。

参考文献:

- [1] 刘立. 双声路声表面波传感器的设计[D]. 西安:长安大学,2012.