

面向电网应用的 SAW 温度传感器设计

王磊¹, 刘文^{1,2}, 卢小荣¹

(1. 武汉邮电科学研究院, 湖北 武汉 430074; 2. 华中科技大学 武汉光电国家实验室, 湖北 武汉 430074)

摘要:针对谐振型声表面波(SAW)传感器,研究了3种不同窗函数加权对SAW传感器谐振响应副瓣抑制的影响,仿真结果表明,凯瑟尔窗在旁瓣抑制上性能最优,阻带最小衰减达-120.2 dB。同时制备了以LST切型石英为基片材料,凯瑟尔窗为加权函数的SAW温度传感器。测试和应用试验表明,所设计的传感器性能具有良好的-一致性、温度频率特性和旁瓣抑制能力,能较好满足面向电网温度状态监测的应用。

关键词:声表面波(SAW);温度传感器;谐振器;凯瑟尔窗;电网应用

中图分类号:TN384 文献标识码:A

Design of SAW Temperature Sensor for Grid-oriented Application

WANG Lei¹, LIU Wen^{1,2}, LU Xiaorong¹

(1. Wuhan Research Institute of Posts and Telecommunications, Wuhan 430074, China;

2. Wuhan national laboratory for optoelectronics, Huazhong University of Science & Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: Aimed at resonant surface acoustic wave (SAW) sensor; the influences of side-lobe rejection levels of three different window functions on SAW sensor are researched. Simulation results show that the performance of Kaiser window with high stop-band attenuation up to -120.2 dB is more excellent than the other two. Meanwhile, SAW temperature sensor is designed using SiO₂ crystal as the substrate material at LST cut and weighted inter-digital transducer with Kaiser window. Test results present that the designed SAW temperature sensor has good consistency, temperature-frequency characteristic and side-lobe rejection. It can well meet the temperature monitoring application of power grid.

Key words: surface acoustic wave (SAW); temperature sensor; resonator; Kaiser window; grid-oriented application

0 引言

在电力领域,高电压、大电流、强磁场的环境对状态监测设备提出了高要求。电气安全距离也限制了一些监测技术的应用。伴随智能电网的发展建设,电力设备温度状态监测技术越来越受重视,红外技术、光纤传感、有源无线方案等相继得到了应用。但这类方案的缺点导致其未能大范围推广。随着传感器技术的发展,新型传感器不断出现,其中声表面波(SAW)温度传感器凭借体积小,灵敏度高,抗干扰能力强,易实现无线传感,无需供电等特点^[1]受到了人们的重视。

针对SAW温度传感器在智能电网温度状态监测中的应用,本文对谐振型SAW温度传感器展开研究,通过对构成谐振器的叉指换能器(IDT)进行加权设计,研究合理的加权参数,保障传感器谐振响应具有良好主瓣带宽和旁瓣抑制能力,提高传感器

性能。保障SAW温度传感器的电力设备温度状态监测中的可靠应用。

1 SAW传感器基片材料

SAW传感器的传感基础是压电和逆压电效应。所以SAW传感器的基片材料需具有较好的压电性能。一般可选用的材料^[2]有石英、铌酸锂、陶瓷等。这些材料性能上均能满足。但铌酸锂、陶瓷等材料价格较高。石英加工和制备工艺成熟,价格适中,满足大规模生产的要求。对于温度传感而言,SAW器件的频率 f 与温度 T 关系为

$$f(T) = f(T_0) [1 + b_0(T - T_0) + b_1(T - T_0)^2 + \dots] \quad (1)$$

式中: b_0 为一阶温度系数; b_1 为二阶温度系数。由式(1)可发现, f 与 T 不是简单的线性关系。非线性将增加传感信号的检测处理难度,增加硬件检测系统的成本和难度。为使式(1)逼近线性关系,就需

收稿日期:2011-10-11

基金项目:国家创新基金资助项目(11C26224212716)

作者简介:王磊(1986-),男,湖北十堰人,硕士生,主要从事声表面波温度传感器设计及在电网中的应用。

选择合适压电晶体和合适的晶向。使压电材料在某个晶向上有特别显著的一阶温度系数和很低的二阶温度系数。研究^[1]表明 JCL 和 LST 切向石英满足上述条件。表 1 为相关参数。

表 1 石英不同切向下的参数

切向	声速/(m/s)	$b_0/10^{-6} \text{ K}^{-1}$	$b_1/10^{-9} \text{ K}^{-1}$
JCL	3 271	18	-1.5
LST	3 347	28	-2.0

综合考虑成本和性能要求,石英是设计 SAW 温度传感器合适的基片材料。

2 SAW 传感器的 IDT 结构设计

2.1 IDT 结构设计

谐振型 SAW 传感器的谐振器由一个 IDT 和反射栅阵形成谐振腔。其中单端谐振器的结构如图 1 所示,左右反射栅和 IDT 构成了谐振腔,腔长为 $2L$ 。叉指电极的宽度、相邻电极的间隔、声孔径、反射栅与 IDT 间距 l_g 、电极数目是 IDT 谐振腔的重要结构参数。它们共同影响 SAW 谐振器的频响特性和最终 SAW 传感器的性能。对于等指长、等周期的单端 IDT 谐振器,脉冲响应为辛格函数,其频率响应有较高的旁瓣电平,带外抑制仅约为 13 dB^[3],这无法满足应用要求。对于面向电网应用的 SAW 温度传感器,由于电气安全距离的限制,要求无源无线传感工作稳定或工作距离远。

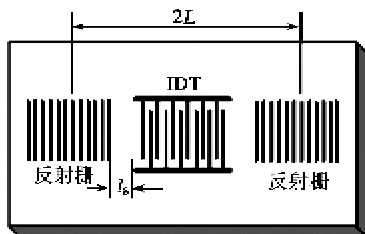


图 1 谐振型 SAW 传感器结构

根据 SAW 无源无线传感系统检测原理类似雷达检测原理可知,若 SAW 谐振器具有良好的旁瓣电平特性及较窄的主瓣,则回波信号强,检测容易;在相同传感距离下,传感信号强度将增加;在相同检测信噪比下,检测的距离变远。所以提高 SAW 传感器的传感性能需改善传感器谐振的频响特性。常用的改善 IDT 的频响特性是对 IDT 进行加权,用相对平滑的窗口函数截断均匀 IDT 的脉冲响应,经典的降低副瓣的窗函数有布莱克曼窗、汉宁窗、海明窗、凯瑟尔窗等,本文在分析各种窗函数的特性后选取了旁瓣较小,主瓣较窄的海明窗、凯瑟尔窗和汉宁窗作为加权函数。3 种窗函数表达式分别为

$$w(n) = 0.5384 - 0.4616 \cos\left(\frac{2\pi n}{N-1}\right) \quad (2)$$

$$w(n) = \frac{I_0\left(\pi\alpha\sqrt{1-\left(\frac{2n}{N-1}-1\right)}\right)}{I_0(\pi\alpha)} \quad (3)$$

$$w(n) = 0.5\left(1 - \cos\left(\frac{2\pi n}{N-1}\right)\right) \quad (4)$$

式中: $\alpha=12.965$; $n=0,1,\dots,N-1$; N 为 IDT 条数。用窗函数 $w(n)$ 对均匀 IDT 的脉冲响应 $x(n)$ 截断,并进行加权处理得到脉冲响应为

$$h(n) = x(n) \cdot w(n) \quad (5)$$

加权后的 IDT 频率响应为脉冲响应式(4)的傅里叶变换。设计中通过仿真得到在相同的 IDT 数目不同加权函数的性能对比,对比数据如表 2 所示。

表 2 不同加权函数的性能

窗口函数类型	海明窗	凯瑟尔窗	汉宁窗
IDT 对数	200	200	200
阻带最小衰减/dB	-53.58	-120.2	-44.24
主瓣 3 dB 带宽/MHz	3.714	3.423	3.822

由表 2 可知,当 $\alpha=12.965$ 时,凯瑟尔窗函数相比海明窗和汉宁窗旁瓣抑制能力最好,阻带最小衰减达 -120.2 dB,是三者中最优的函数,且主瓣带宽较窄。采用凯瑟尔窗函数加权 IDT,仿真所获得频率响应图形如图 2 所示。

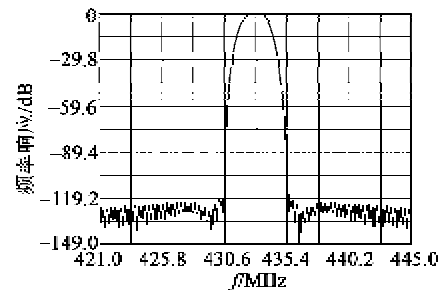


图 2 凯瑟尔窗加权的频率响应图

为验证实际凯瑟尔窗函数加权的性能,根据理论仿真设计中获得的权值数据设计了带有“假指”的 IDT 加权结构如图 3 所示。

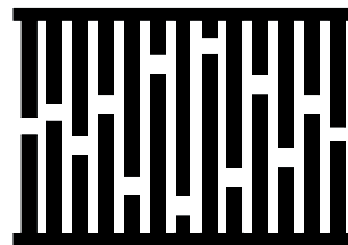


图 3 IDT 加权结构示意图

图 3 中谐振腔的中心频率 $f=431.8 \text{ MHz}$ 。由 $\lambda f=v$ ($v=3\,346.45 \text{ m/s}$ 为 SAW 传播速度) 可得 $\lambda=7.75 \mu\text{m}$ 。取电极的宽度与相邻电极的间隔相等均为 $\lambda/4$,反射栅电极条数为 180, IDT 电极数目为 200 对, $l_g=\lambda/2$, IDT 孔径长度为 130λ 。依照此结

构,以石英为压电基片,经过石英晶元清洁、镀膜、光刻、频率修正、划片、粘片、引线键合、倒装焊、封装等工艺^[4]加工出 SAW 温度传感器。

3 SAW 温度传感器设计验证

3.1 测试 s_{11} 参数

利用网络分析仪对加工完成的 SAW 温度传感器芯片测试其 s_{11} 参数,测试结果如图 4 所示。由图可知,主谐振点附近,无明显次谐振点,表明凯瑟尔窗函数旁瓣抑制效果好,使 SAW 芯片在工作频带内响应信号损耗小,带外损耗大。

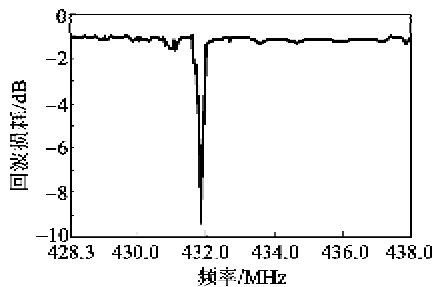


图 4 传感器回波损耗图

3.2 检验芯片性能一致性

随机抽取 4 片芯片,考察谐振频率、最小回波损耗、谐振点输入阻抗 3 个参数,测试结果如表 3 所示。由表可知,实际制备的 SAW 温度传感器芯片参数一致性较好。表明设计所选取 IDT 的尺寸参数能适应当前工艺水平。

表 3 SAW 芯片测试参数

编号	谐振频率/MHz	最小 s_{11} /dB	输入阻抗/ Ω
1	431.78	-9.21	63.78-j55.36
2	431.80	-9.17	64.24-j54.54
3	431.75	-9.22	64.12-j54.32
4	431.83	-9.20	63.83-j53.43

3.3 检验其频率温度特性

按照设计参数制备的 SAW 芯片采用 LST 切向的石英衬底,同时镀氧化锌膜改善机电耦合系数和温度系数^[5],经温巡测试,其频率-温度特性如图 5 所示。

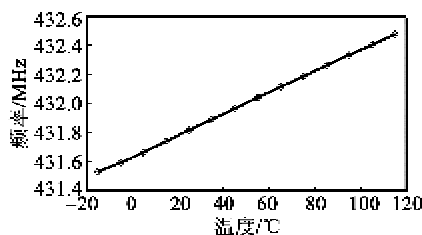


图 5 传感器频率-温度特性曲线

测试数据显示传感器频率温度关系为

7.8 kHz/°C。拟合线性度为 99.99%，满足预期的设计目标。在完成对所设计芯片的参数验证后,为检验芯片在电力设备温度在线监测中的实际工作性能,采用凯瑟尔窗函数加权分别制作了工作频率在 429 MHz, 430.4 MHz, 431.8 MHz, 433.2 MHz, 434.6 MHz, 436 MHz 6 种频率的 SAW 温度传感器。经过匹配、装配天线、外罩封装后安置于电力开关柜中的母线接头处,实际挂网运行所监测的部分温度变化曲线如图 6 所示。6 个监测点温度变化轨迹符合电力投运负荷变化。试验证明所设计的传感器能较好满足面向电网温度状态监测的应用。

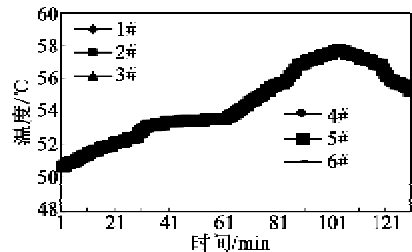


图 6 温度监测曲线

4 结束语

SAW 谐振器是 SAW 谐振式温度传感器的核心,采用石英基片材料、凯瑟尔窗函数加权的 SAW 谐振器旁瓣抑制能力强,所制备的大量芯片参数一致性好。芯片参数测试和应用试验证明本文方法所设计的 SAW 温度传感器能较好满足面向电网温度状态监测的应用。

参考文献:

- [1] 胡爱民. 微声电子器件[M]. 北京:国防工业出版社, 2008:102-103.
- [2] 郝俊杰,徐廷献. 声表面波用基片材料[J]. 硅酸盐通报, 2000, 19(6):32-36.
HAO Junjie, XU Tinxian. SAW substrate materials [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2000, 19 (6):32-36.
- [3] HIROYUKI N. Analysis of SAW resonator on SiO₂/Al/LiNbO₃ structure by using FEM/SDA[C]//Japan, Symposium Ultrasonic Electronics, 2009, 467-488.
- [4] 徐海林,陈培林. 声表面波器件叉指换能器的制作技术[J]. 通信技术与设备, 2002, 28(4):19-21.
XU Hailin, CHEN Peilin. The making technology of IDT[J]. Communications Technology and Equipment, 2002, 28(4):19-21.
- [5] HASHIMOT K Y. 声表面波器件模拟与仿真[M]. 王景山,译. 北京:国防工业出版社, 2002:190-191.