

谐振型 SAW 无线无源传感器的测试系统研究

王睿,张万里,彭斌,邓森洋,邓言文,姜建英

(电子科技大学 电子薄膜与集成器件国家重点实验室,四川 成都 610054)

摘要:采用一种低成本、高效率的电路系统实现对谐振型无线无源声表面波(SAW)传感器的测试。该电路利用直接数字频率合成(DDS)技术产生不同频率的射频信号用以激励 SAW 传感器。在接收端采用功率探测器检测回波信号的包络,通过包络的变化得到待测物理化学参量的变化。该测试系统产生的激励信号功率最高可达 10 dBm,测试时间约为 0.5 s,与矢量测试结果相比,其测试相对误差仅为 0.002 4%。实验结果表明,该系统能够稳定、可靠地实现谐振型 SAW 传感器的快速检测。

关键词:谐振型声表面波(SAW)传感器;无线无源;直接数字频率合成;功率探测器

中图分类号:TN65;TN830.2;TN850.2 **文献标识码:**A

Research on the Measurement System for Wireless Passive Resonant SAW Sensors

WANG Rui, ZHANG Wanli, PENG Bin, DENG Senyang, DENG Yanwen, JIANG Jianying

(State Key Lab. of Electronic Thin Films and Intergrated Devices, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China)

Abstract: A low-cost and high-efficiency circuit was used to measure the wireless passive resonant SAW sensors in this work. DDS technology was used to generate RF signals with different frequencies to excite the SAW sensor. A power detector was used in the receiving circuits to measure the envelope curves of echo signals. By analyzing the envelope, the physical or chemical parameters can be measured via this circuit. The power of the excitation signal produced by this system is up to 10 dBm and the test time is about 0.5 s while the relative error is only 0.002 4% compared with the results from VNA. The results show that this circuit can detect the resonance frequency of SAW sensor reliability.

Key words: resonant SAW sensor; wireless and passive; DDS; power detector

0 引言

声表面波(SAW)传感器是一种新型的传感器,与传统传感器相比,其具有体积小,成本低,稳定性高及易于批量生产等特点^[1-2]。同时,SAW 传感器能够实现无线无源化^[3],特别适宜在高温、高压、高转速、密闭空间等极端恶劣环境中对温度^[4]、扭矩^[5]、应变等物理化学参量进行测量。SAW 传感器一般分为谐振型和延迟线型两种。谐振型 SAW 传感器具有品质因数(Q)值高、插损小和更灵敏的优点^[6]。SAW 谐振器由沉积在压电基底上的一个叉指换能器(IDT)以及在 IDT 两边对称分布的两组反射栅组成^[7]。IDT 与反射栅构成一个谐振腔,使得 SAW 谐振器只对特定频率的射频信号产生显著响应,这个特定的频率即为 SAW 谐振器的谐振频率。

随着外界条件的变化,SAW 谐振器的谐振频率会随之改变,通过测试其谐振频率的变化可得到对应的待测物理化学参量^[8-11]。

无线测试系统是 SAW 传感器在实际应用中的关键环节之一。本文通过现场可编程门阵列(FPGA)采用直接数字频率合成技术(DDS)和锁相环(PLL)倍频技术,产生了一系列功率相同,频率在 433.8 MHz 附近变化的扫频信号对 SAW 传感器进行激励。回波信号经过低噪声放大后,利用功率探测器得到其包络。通过对包络信号进行数据处理,得到 SAW 传感器的谐振频率,从而得到待测的物理化学参量。该电路采用功率探测器得到回波信号的包络,与传统的下变频方式相比,其不需提供本振信号源,简化电路结构,降低 A/D 采样难度的同时

收稿日期:2015-07-24

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61223002)

作者简介:王睿(1992-),男,四川南充人,硕士生,主要从事无线无源声表面波传感器测试电路的研究。彭斌(1975-),男,四川大邑人,教授,主要从事电子薄膜与器件的研究。

降低了成本,提高了稳定性和可靠性。

1 SAW 传感器测试系统原理

谐振型 SAW 无线无源传感器测试系统如图 1 所示。首先通过 FPGA 采用 DDS 技术产生不同频率的低频信号,再利用 PLL 将低频信号进行倍频处理,得到所需的高频激励信号。经过带通滤波和功率放大后,将激励信号通过射频单刀双掷开关由天线传递至 SAW 传感器。射频开关由一个 TTL 方波信号控制,实现激励信号的调制以及收发信号的隔离功能。当 TTL 信号为低电平时,发射端与天

线端连通,激励信号通过天线传递至 SAW 传感器,在逆压电效应的作用下将电能转化为机械能,通过 IDT 在压电基底上激励起 SAW。当 TTL 信号为高电平时,天线端与接收端连通,在压电效应的作用下将 SAW 传感器中的机械能转化为电能,通过 IDT 激励出与 SAW 频率相同,幅度随时间指数衰减的射频信号。将该信号通过低噪声放大器和功率探测器处理后,得到回波信号的包络。通过对 A/D 采样后的包络信号进行数据处理,可得到谐振型 SAW 传感器的谐振频率,从而测量出待测的物理化学参量。

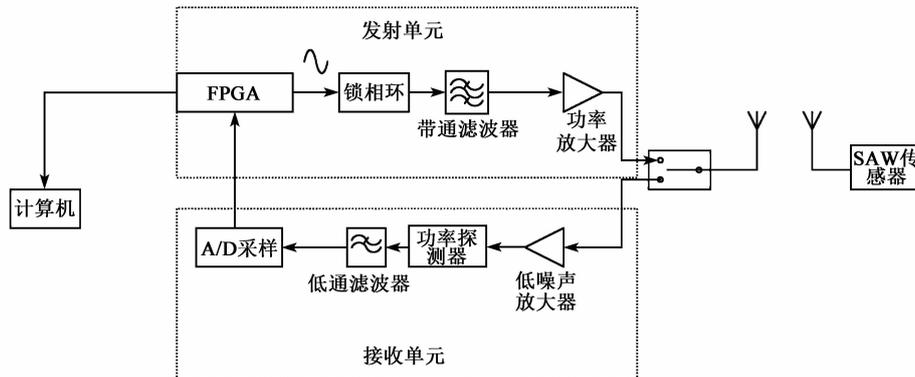


图 1 谐振型 SAW 传感器无线测试系统

2 电路实现

2.1 信号发射单元

DDS 主要由相位累加器、数据存储单元、D/A 转换器和低通滤波器 4 部分组成。正弦信号的幅度值储存在数据存储单元中,在系统时钟的驱动下通过对频率控制字与相位累加器进行累加获得相位地址,从而得到正弦信号的数字量幅度大小,再利用 D/A 转换器将数字量幅度大小转化为模拟量,最后经过低通滤波器即可输出标准的模拟正弦信号。产生的正弦信号的频率^[12]为

$$f_{\text{RF}} = M \times \frac{f_c}{2^{32}} \quad (1)$$

式中: f_c 为系统时钟频率; M 为频率控制字。通过改变 M 的大小可实现正弦信号频率的调节。

32 位可调频率控制字由 FPGA 内部的微处理器产生,相位累加器和数据存储单元由 FPGA 提供,本文采用的是 Altera 公司的 Cyclone IV E 系列的 FPGA 芯片。该系列的 FPGA 同时满足了高性能与低功耗的要求。D/A 转换器采用的是 8 位、125 Msps 的 AD9708 芯片。为防止高频噪声的干扰,在 D/A 模块后接入了一个截止频率为 40 MHz 的七阶巴特沃斯低通滤波器。

倍频放大模块的作用是将 DDS 产生的低频正弦信号倍频至 SAW 谐振器的谐振频率附近,并将信号功率适当放大。本文采用 MAX1472 芯片来实现上述功能,该芯片内部集成了一个完整的 32 倍频锁相环和一个高效率的功率放大器。

2.2 信号接收单元

低噪声放大器(LNA)的作用是将从天线接收到的微弱传感器信号进行放大,一般置于无线接收单元的最前端。由于其噪声系数较低,有利于得到信噪比较好的传感器信号。本文采用的是 Mini-Circuit 公司的 ZX60-P103LN+ 型 LNA,该 LNA 在 433 MHz 时的输入电压驻波比为 1.79,输出电压驻波比为 1.05,增益为 20.47 dB。

功率探测器的作用是检测传感器回波信号的包络,本文采用的是 herotek 公司的 DZR185AA 零偏压肖特基二极管检波器,其输出为负电压,探测灵敏度为 0.5 mV/ μ W。将得到的包络信号经过低通滤波由 A/D 转换后传入 FPGA 进行数据处理。本文采用的 A/D 转换芯片是最大采样速率为 32 Msps 的 8 位 AD9280 芯片。

2.3 数据处理单元

本文的数据处理通过 FPGA 来实现。其顶层电路如图 2 所示。

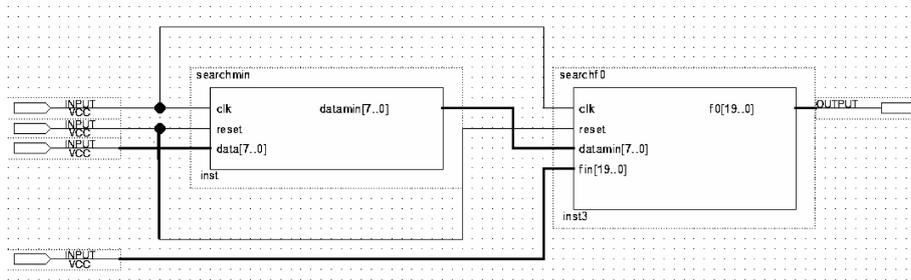


图2 数据处理顶层电路图

图2中,clk为50 MHz的系统时钟信号,reset为复位信号,data[7:0]为A/D采样得到的包络信号数字值,fin[19:0]为激励信号的频率。当激励信号的频率等于谐振型SAW传感器的谐振频率时,所检测到的包络幅值达到最大。相反,当激励信号的频率远离SAW传感器的谐振频率时,所检测到的包络幅值逐渐减小。通过searchmin模块得到各个不同频率激励信号作用下回波信号包络的幅值,再通过searchf0模块对这些包络幅值进行比较,包络幅值最大时对应的激励信号的频率 f_0 即为谐振型SAW传感器的谐振频率。实测结果表明,从产生扫频信号到得出谐振频率仅需0.5 s。

整个测试系统的实物如图3所示。测试过程中各信号的波形如图4所示。

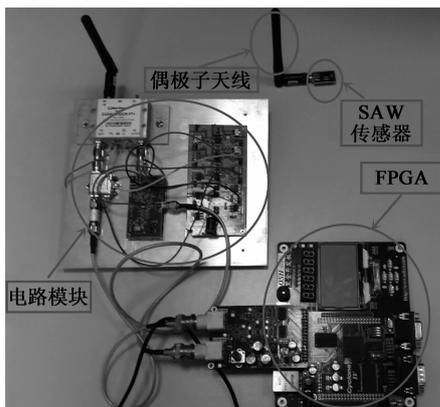


图3 测试系统实物图

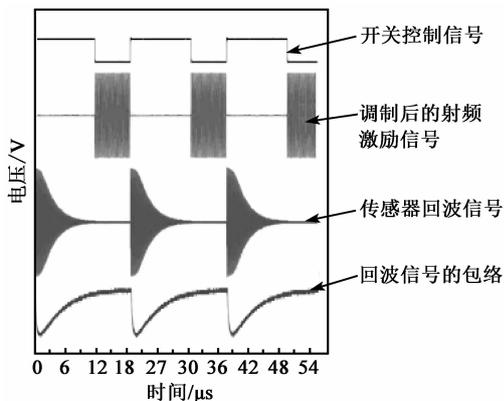


图4 测试过程中各信号波形图

3 实验结果与讨论

利用设计的测试系统,本文在常温下无线测试了一种SAW传感器的谐振频率,该传感器由一个谐振频率在433.8 MHz附近的石英谐振器和偶极子天线构成。测试产生的激励信号的功率为10 dBm,频率为433~434.5 MHz的扫频信号,测试结果如图5所示。

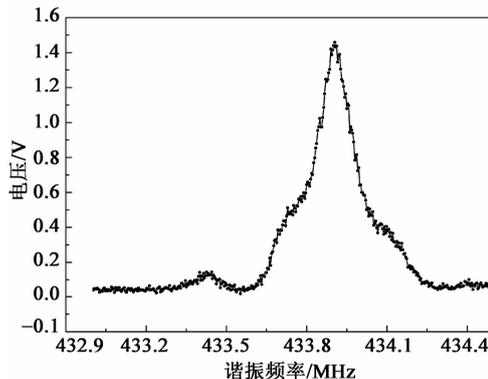


图5 常温下无线测试结果

采用本文制作的测试系统在常温下对待测试器件进行连续30次测试的结果如表1所示。

表1 常温下SAW传感器谐振频率多次测量的结果

序号	f_r /MHz	序号	f_r /MHz	序号	f_r /MHz
1	433.882	11	433.890	21	433.882
2	433.886	12	433.894	22	433.886
3	433.886	13	433.890	23	433.882
4	433.894	14	433.886	24	433.890
5	433.886	15	433.894	25	433.886
6	433.890	16	433.894	26	433.886
7	433.886	17	433.886	27	433.890
8	433.882	18	433.886	28	433.886
9	433.890	19	433.882	29	433.894
10	433.898	20	433.894	30	433.886

由表1可得器件谐振频率的算数平均值为433.888 MHz,其标准差为4.426 kHz。使用矢量网络分析仪在相同温度下对该样品也进行30次重复测试,得到的谐振频率算数平均值为433.898 5 MHz。可以看出,本测试系统的测试结果和矢网测试结果

相差仅 0.010 5 MHz,相对误差约 0.002 4%。这表明本文设计的测试系统能准确、可靠地测试出 SAW 谐振器的谐振频率。

采用上述方法,本文对不同温度下的 SAW 传感器的谐振频率分别进行了 30 次重复测试,并取其算数平均值,得到的传感器谐振频率-温度曲线如图 6 所示。由图可看出,随着温度的升高,谐振频率逐渐降低。

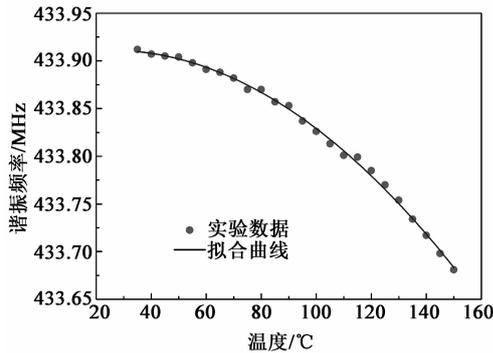


图 6 不同温度下谐振频率与温度的关系曲线

一般情况下,SAW 传感器谐振频率与温度之间的关系可用下式描述^[13]:

$$f = f_0 [1 + a(T - T_0) + b(T - T_0)^2 + c(T - T_0)^3 + \dots] \quad (2)$$

式中: T_0 为参考温度; f_0 是温度为 T_0 时 SAW 传感器的谐振频率; a 、 b 、 c 分别为一阶、二阶、三阶频率-温度系数,通常考虑一阶、二阶系数即可。根据式(2),对图 6 中不同温度下测试得到的频率温度关系进行拟合后得到下面的关系式:

$$f = -1.453\ 63 \times 10^{-5} T^2 + 7.193\ 09 \times 10^{-4} T + 433.902\ 42 \quad (3)$$

由上述结果可看出,本文设计的测试电路系统能够实现 SAW 温度传感器的无线测试。

4 结束语

本文设计并制作了一种基于谐振型无线无源 SAW 传感器的测试系统,并通过该系统对 SAW 传感器进行了温度测试及误差分析。该测试系统产生的激励信号功率最高可达 10 dBm,单次测试时间约为 0.5 s,与矢量测试结果相比,相对误差仅为 0.002 4%。实验结果证明,该系统具有较高的准确度和可靠度,较低的成本和功耗,能较好地实现谐振型 SAW 传感器的快速检测。

参考文献:

- [1] POHL A. A review of wireless SAW sensors[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and

Frequency Control, 2000, 47(2):317-332.

- [2] BULST W E, FISCHERAUER G, REIEIDL L. State of the art in wireless sensing with surface acoustic waves[J]. Industrial Electronics, 2001, 48(2): 265-271.
- [3] LI F, XIANG D, CHIANG S, et al. Wireless surface acoustic wave radio frequency identification (SAW-RFID) sensor system for temperature and strain measurements[C]//Taipei, Taiwan: Ultrasonics Symposium (IUS), 2011 IEEE International IEEE, 2011: 822-825.
- [4] WANG W, XUE X, HUANG Y, et al. A novel wireless and temperature-compensated SAW vibration sensor[J]. Sensors, 2014, 14(11):20702-20712.
- [5] LIN C J, HUNG C W, LIN H P. A study of wireless torque sensing based on SAW sensors[C]//Mannheim, German: Computer Communication Control and Automation(3CA), 2010 International Symposium on IEEE, 2010, 2: 211-214.
- [6] POHL A. A review of wireless SAW sensors[J]. Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, IEEE Transactions on, 2000, 47(2):317-332.
- [7] POHL A, OSTERMAYER G, SEIFERT F. Wireless sensing using oscillator circuits locked to remote high-Q SAW resonators[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 1998, 45(5):1161-1168.
- [8] PEREIRA DA CUNHA M, LAD R J, DAVULIS P, et al. Wireless acoustic wave sensors and systems for harsh environment applications[C]//Phoenix, Arizona, USA: IEEE Topical Conference on Wireless Sensors and Sensor Networks(WiSNet), IEEE, 2011:41-44.
- [9] STONEY R, GERAGHTY D, O' DONNELL G. Characterisation of differentially measured strain using passive wireless surface acoustic wave(SAW) strain sensors[J]. Sensors Journal, IEEE, 2013, 14(3): 722-728.
- [10] LIN C J, HUNG C W, LIN H P. A study of wireless torque sensing based on saw sensors[C]//Mannheim, German: 2010 International Symposium on Computer Communication Control and Automation(3CA) IEEE, 2010, 2: 211-214.
- [11] SCHIMETTA G, DOLLINGER F, WEIGEL R. A wireless pressure-measurement system using a SAW hybrid sensor[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2000, 48(12):2730-2735.
- [12] CHREN JR W A. Direct digital frequency synthesizer:5430764[P]. 1995-07-04.
- [13] 李永刚, 李伟, 朱嘉林. 声表面波传感器检测电路的研究[J]. 微纳电子技术, 2008, 45(10):601-605.