

Research on a Wireless Passive Temperature Sensor of LC Resonant*

WANG Yuanchao, PENG Bin*, HUANG Wulin

(State Key Laboratory of Electronic Thin Films and Integrated Devices, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China)

Abstract: Wireless passive sensors have great potential applications in industry. A wireless passive LC resonant temperature sensor based on ceramic with high dielectric constant was designed and prepared in this work. The characteristics of the sensor had been measured under different temperature by wireless inductor coupling. The results show that the resonant frequency of the wireless passive temperature sensor is 1.2 MHz, The resonant frequency of the sensor decreases linearly with the increasing of the ambient temperature. The temperature sensitivity of the sensor is 2.3 kHz/°C. Temperature detection is realized wirelessly with the sensor. The designed sensor is suitable for working in harsh environments for temperature sensing.

Key words: wireless passive sensor; temperature; wireless detection; LC resonance

EEACC: 7110; 7230

doi: 10.3969/j.issn.1004-1699.2013.10.005

一种 LC 谐振无线无源温度传感器的研究*

王渊朝, 彭斌*, 黄武林

(电子科技大学, 电子薄膜与集成器件国家重点实验室, 成都 610054)

摘要: 无线无源传感器在工业领域具有重要的应用。设计了一种基于高介电常数陶瓷基板的无线无源 LC 谐振温度传感器, 采用电感耦合的方式无线测试了传感器在不同温度下的特性。测试结果表明所制作的无线无源温度传感器谐振频率为 1.2 MHz, 随着温度的升高其谐振频率线性降低, 灵敏度为 2.3 kHz/°C。制作的器件实现了非接触式的温度测量, 可以在比较恶劣的环境下使用。

关键词: 无线无源传感器; 温度; 无线检测; LC 谐振

中图分类号: TP212.1

文献标识码: A

文章编号: 1004-1699(2013)10-1341-04

现代工业生产尤其是自动化生产过程中, 要用各种传感器来监视和控制生产过程中的各个参数^[1], 传感器的应用使得生产信息的获取更加安全可靠。目前监测系统中所使用的大部分传感器都是有源有线传感器, 需要由电源模块提供能量, 这种方式存在着电源更换麻烦和因测量系统体积和质量过大不容易调节, 不容易维护等问题^[2]。无线无源传感器在这些方面正好有着无可比拟的优点, 尤其在如旋转部件、密封部件等某些特殊环境中无线无源传感器就可以满足一些苛刻要求^[3]。因此近年来无线无源传感器得到快速的发展和应用。常见的无线无源传感器包括声表面波(SAW)传感器^[4-6], LC 谐振型传感器^[7-9]。其中, 基于 LC 谐振原理的无线无源传感器具有结构简单、易于实现和探测的优点, 而得到了研究者的广泛重视。如美国波多黎各大学

Wang 等人利用陶瓷电容和电感线圈构建了 LC 谐振器件, 实现了对温度的无线无源检测。然而其器件由分立元件构成, 难以小型化。

本文采用陶瓷基板, 将电感和电容集成在一个陶瓷基片上, 实现了集成的无线传感器。同时, 在基片双面设计平面电感, 增加了电感量使得器件谐振频率降低, 从而减小了器件尺寸。本文详细研究了器件的设计, 制备并测试了器件的性能。

1 LC 谐振温度传感器的原理

本文设计的 LC 谐振温度传感器由平面螺旋电感 L 和平板电容 C 串联构成。平板电容采用介电常数比较大并且对温度敏感的陶瓷基片, 当温度变化时, 陶瓷基片的介电常数随温度变化, 由平板电容公式 $C = \epsilon S/d$ 可以知道介电常数的变化直接使得平

板电容的电容值发生变化,而 LC 谐振回路的谐振频率由 $f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$ 决定,可以看出电容的变化直接影响谐振频率的变化。本文所设计的传感器正是利用温度对介电常数的影响,进而影响谐振频率,通过对谐振频率的测量,来表征温度的变化。

为了实现对 LC 谐振传感器的无线测试,本文采用线圈耦合的方式,即采用一个测试线圈置于传感器的上方,通过测试线圈和传感器的电感之间的电感耦合来获得传感器的谐振频率。图 1 为传感器和测试线圈的等效电路图, R_2 为测量线圈的电阻, L_2 为测量线圈电感。 R_1 为传感器的电阻, L_1 、 C_1 分别为传感器螺旋电感和平面电容, M 为电感 L_1 与 L_2 的互感。

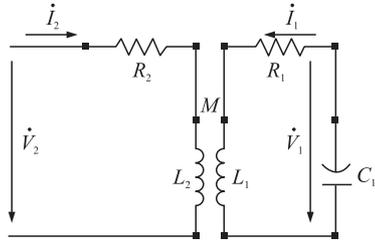


图 1 传感器与测试线圈的等效电路

只有测试线圈时,测试线圈端口电压由基尔霍夫电压定律可知:

$$\dot{V}_2 = (R_2 + j2\pi f L_2) \dot{I}_2 \quad (1)$$

当测试线圈接近传感器后,由于电感之间的耦合,端口电压为:

$$\dot{V}_2 = (R_2 + j2\pi f L_2) \dot{I}_2 + j2\pi f M \dot{I}_1 \quad (2)$$

$$\dot{V}_1 = (R_1 + j2\pi f L_1) \dot{I}_1 + j2\pi f M \dot{I}_2 \quad (3)$$

$$M = k\sqrt{L_1 L_2} \quad (4)$$

式中 M 为 L_1 和 L_2 的互感, k 为耦合系数。电容 C_1 端口电压可写为:

$$\dot{V}_1 = \frac{-\dot{I}_1}{j2\pi f C_1} \quad (5)$$

因此由式(1)可知,当只有检测线圈时候端口阻抗为:

$$Z_2 = R_2 + j2\pi f L_2 \quad (6)$$

同样由式(2)~式(4)可以得出,当线圈作用于传感器时端口阻抗:

$$Z_1 = R_2 + j2\pi f L_2 + \frac{(2\pi f M)^2}{R_1 + j2\pi f L_1 - \frac{j}{2\pi f C_1}} \quad (7)$$

传感器是一个 LC 谐振电路,其谐振频率 f_0 和品质因数 Q 为^[10]:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1 C_1}} \quad (8)$$

$$Q = \frac{1}{R_1} \sqrt{\frac{L_1}{C_1}} \quad (9)$$

通过式(7)~式(9)可以得出阻抗 Z_1 的实部和虚部及阻抗 Z_1 的相位:

$$\text{Im}\{Z_1\} = 2\pi f L_2 \left(1 + kQ^2 \frac{1 - (f/f_0)^2}{1 + Q^2 (f/f_0 - f_0/f)^2} \right) \quad (10)$$

$$\text{Re}\{Z_1\} = R_2 + 2\pi f L_2 k^2 Q^2 \frac{f/f_0}{1 + Q^2 (f/f_0 - f_0/f)^2} \quad (11)$$

$$|Z_1| = \sqrt{\text{Im}^2\{Z_1\} + \text{Re}^2\{Z_1\}} \quad (12)$$

$$\angle Z_1 = \arctan \frac{\text{Im}\{Z_1\}}{\text{Re}\{Z_1\}} \quad (13)$$

本文中对传感器的无线测试,就是基于对阻抗大小及相位角的测试,来判断传感器是否发生谐振^[11],并获得谐振频率和温度的关系,从而通过谐振频率的测量实现温度的无线测量。

2 设计制备与测试

本文所设计的 LC 谐振温度传感器如图 2 所示。为了获得较大的电感量,基片正面和反面采用相同的圆形螺旋电感,这是因为圆形螺旋电感线圈比其他平面螺旋电感线圈的品质因数 Q 和电感值均高^[12],两面的螺旋电感通过基片边缘用导电胶连接一起,结构如图 3 所示。

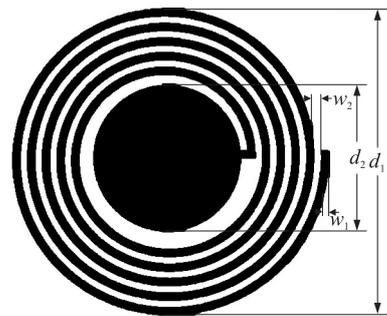


图 2 传感器单面示意图

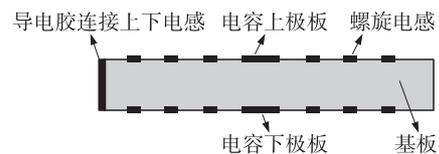


图 3 传感器截面图

基片采用厚度为 0.2 mm,相对介电常数约为 2300 的陶瓷薄片。螺旋电感和平板电容的结构参数如表 1 所示。其中 h 为基片厚度, d_1 为平面螺旋电感外径, d_2 为平板电容直径, w_1 为螺旋电感线宽, w_2 为螺旋间距, ϵ_r 为陶瓷基片相对介电常数,螺旋电感匝数为 N ,根据这个结构参数,可以计算出平板

电容大小为 8 nF。平面螺旋电感值可以根据经验公式计算^[13-14], 大小为 0.82 μH。考虑到基片双面都有电感, 可以计算出传感器的谐振频率约在 1.38 MHz 附近。

制作过程中传感器基片表面电路采用光刻剥离和蒸镀铜工艺形成。为了降低电路的电阻, 在形成图形后, 本文采用电镀 Cu 的工艺对电路进行加厚, 使得 Cu 层的厚度达到 10 μm 以上, 最终制成的样品实物图如图 4 所示。

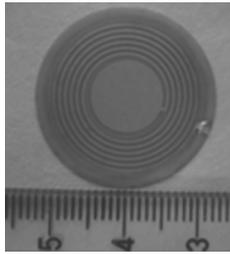


图 4 传感器实物图

为了无线测试传感器的温度特性, 将传感器和测试线圈置于温控箱内, 通过改变温控箱内的温度, 来测试不同温度下器件的谐振频率, 测试温度在室温和 125 °C 之间。耦合感应线圈放置于传感器上方并保持同一耦合距离, 使用安捷伦的 4294A 阻抗分析仪来测量测试感应线圈两端的阻抗频率特性。

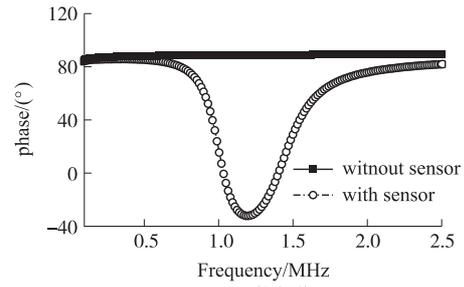
表 1 LC 谐振温度传感器的设计参数

h/mm	d_1/mm	d_2/mm	w_1/mm	w_2/mm	ϵ_r	N
0.2	22	10	0.4	0.4	2300	6

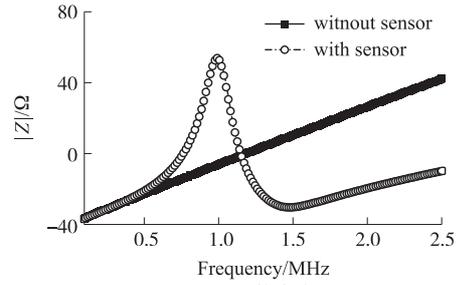
3 结果与讨论

图 5 是室温下测试线圈下方放置传感器和不放置传感器的阻抗特性图。

从图 5 中可以看出, 当没有放置传感器时, 相位接近 90°, 这是因为测试线圈就等效是一个电感(电阻非常小), 而纯电感的阻抗相位是 90°^[15]。当测试线圈靠近传感器时, 可以看出, 在 1.2 MHz 附近, 阻抗和相位均发生突变, 这是由于测试线圈和传感器电感之间存在耦合, 并且表明 LC 传感器发生谐振, 谐振频率在 1.2 MHz 附近。根据 Reinhard 的计算^[16], 相位角的最低点所对应的频率不是 LC 电路的谐振频率, 但是相差不会很远, 所以我们近似用这个最低点的频率来表征谐振频率。可以看出, 测试出来的谐振频率与设计值有较小的偏差, 其原因一方面是螺旋电感之间存在的寄生电容使得谐振频率有所降低, 另一方面螺旋电感计算值是通过经验公式得到, 存在一定偏差。



(a) 阻抗相位



(b) 阻抗大小

图 5 室温下的阻抗特性

从图 5 所示的测试数据曲线, 还可以拟合出传感器的电路参数。由式(6)和式(7)可以得到:

$$Y = \frac{1}{Z_2 - Z_1} = \frac{R_1 + j\omega L_1 + \frac{1}{j\omega C_1}}{(\omega M)^2} \quad (14)$$

其中, $\omega = 2\pi f$ 。定义:

$$Z = \frac{\text{Im}(Y)}{\text{Re}(Y)} = \omega \frac{L_1}{R_1} - \frac{1}{\omega R_1 C_1} \quad (15)$$

则可以得到

$$Z\omega = \omega^2 \frac{L_1}{R_1} - \frac{1}{R_1 C_1} \quad (16)$$

可以看出, $Z\omega$ 随着 ω^2 线性变化。因此, 可以通过线性拟合 $Z\omega \sim \omega^2$ 曲线得到斜率和截距。再通过对传感器电阻的测量, 得到 R_1 约为 2 Ω 左右。从而可以计算出传感器的电感和电容分别为 $L_1 = 2.32 \mu\text{H}$, $C_1 = 12 \text{ nF}$, 这和设计值偏差不是太大。

图 6 为不同温度下传感器的阻抗特性。可以看出谐振频率随着温度的升高向低频方向移动, 当温度为 125 °C 时, 谐振频率降为 0.95 MHz 左右。这是因为所采用的陶瓷片介电常数随温度的升高而增大, 导致平板电容增大, 使得谐振频率降低。

图 7 是谐振频率随温度的变化曲线。可以看出, 谐振频率随温度的升高近线性下降, 采用线性拟合可以得到谐振频率随温度的变化关系为:

$$f_r(\text{MHz}) = 1.24 - 0.0023 \times T \quad (17)$$

因此, 可以看出温度每升高 1 摄氏度, 传感器的谐振频率大约降低 2.3 kHz 左右。一般的阻抗分析仪可以很容易实现 1 Hz 的分辨率, 因此, 传感器的测试精度可以达到 10^{-3} °C 。

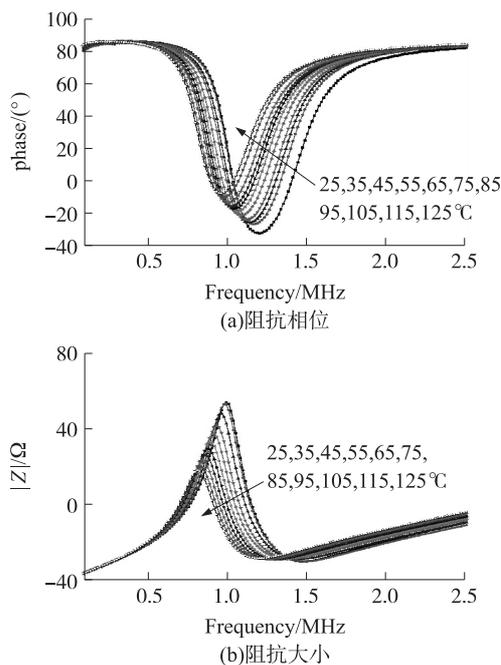


图6 不同温度下的阻抗特性

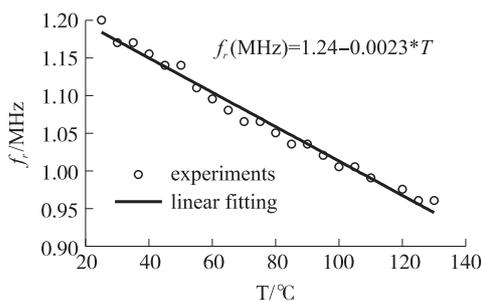


图7 不同温度下的谐振频率

4 结论

本文设计并制作了一种基于高介电常数陶瓷基片的温度传感器,该传感器利用光刻工艺将平板电容和平面螺旋电感集成在一片陶瓷基片上,集成度高,性能稳定,采用无线非接触式测量,解决了高温下测量的局限性,可应用于非接触式温度测量领域。测试结果表明,所制作的传感器的谐振频率为 1.2 MHz,传感器的谐振频率随温度的升高而降低,温度平均每升高 1 摄氏度,传感器的谐振频率大约降低 2.3 kHz 左右。



王渊朝(1987-),男,陕西省咸阳人,硕士,电子科技大学微电子与固体电子学院,研究方向为无线无源温度传感器, xiaoyuanzi25@163.com;

参考文献:

- [1] Mandel C, Schussler M, Jakoby R. A Wireless Passive Strain Sensor [C]//Sensors, 2011 IEEE. IEEE, 2011:207-210.
- [2] 张昊. 无线无源轮胎压力和温度传感器及监测系统研究[D]. 广西工学院, 2012.
- [3] Nabipour M, Majlis B Y. A New Passive Telemetry LC Pressure and Temperature Sensor Optimized for TPMS[J]. Journal of Physics, 2006, 34(1):770.
- [4] Hines J H. Review of Recent Passive Wireless SAW Sensor and Sensor-Tag Activity[C]//Fly by Wireless Workshop(FBW), 2011 4th Annual Canus. IEEE, 2011:1-2.
- [5] Chernenko D, Zhovnir M, Tsyganok B, et al. Wireless Passive Pressure Sensor Using Frequency Coded SAW Structures[C]//Electronics Technology (ISSE), 2012 35th International Spring Seminar on IEEE, 2012:424-428.
- [6] 李平, 文玉梅, 黄尚廉. 声表面波谐振器型无线无源温度传感器[J]. 仪器仪表学报, 2003, 24(4):403-405.
- [7] Jiang H, Lan D, Shahnasser H, et al. Sensitivity Analysis of an Implantable LC Based Passive Sensor[C]//Biomedical Engineering and Informatics (BMEI), 2010 3rd International Conference on IEEE, 2010, 4:1586-1590.
- [8] Wang Y, Jia Y, Chen Q, et al. A Passive Wireless Temperature Sensor for Harsh Environment Applications[J]. Sensors, 2008, 8(12):7982-7995.
- [9] 豆刚, 蒋洪川, 张万里, 等. 基于 LC 谐振的无线无源应变传感器研究[J]. 传感技术学报, 2011, 24(12):1687-1690.
- [10] 胡翔骏. 电路分析[M]. 北京:高等教育出版社, 2001:537-541.
- [11] Yi Jia, Ke Sun, Fredrick Just Agosto. Design and Characterization of a Passive Wireless Strain Sensor[J]. Meas Sci Technol, 2006, 17:2869-2876.
- [12] 康昊, 谭秋林, 秦丽, 等. 基于 LTCC 的无线无源压力传感器的研究[J]. 传感技术学报, 2013, 26(4):498-501.
- [13] 杨卓, 董天林. 射频电路中的平面螺旋电感的计算[J]. 技术前沿, 2007, 9(1):57-60.
- [14] 王昕, 王宗欣, 袁晓军. 圆形螺旋线圈自感和分布电容的计算[J]. 固体电子学研究与发展, 2000, 20(4):425.
- [15] 吴大正, 王松林, 王玉华. 电路基础[M]. 西安:西安电子科技大学出版社, 2007:21-225.
- [16] Nopper R, Niekrawietz R, Reindl L. Wireless Readout of Passive [J]. Instrumentation and Measurement, 2010, 59(9):2450-2457.



彭 斌(1975-),男,四川大邑人,博士,副教授,主要从事电子薄膜材料及其在传感器、微波器件等集成电子器件中的应用研究, bpeng@uestc.edu.cn。