

The TPMS Based on the Nano-Polysilicon Thin Film Pressure Sensor

Xiaosong Zhao, Yang Yu, Jing Chen, Xiaofeng Zhao*

Key Laboratory of Electronics Engineering, College of Heilongjiang Province, Heilongjiang University, Harbin Heilongjiang

Email: 1085562584@qq.com, *zxf80310@126.com

Received: Jun. 19th, 2015; accepted: Jul. 7th, 2015; published: Jul. 14th, 2015

Copyright © 2015 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

This paper presents the nano-polysilicon thin film pressure sensor, which consists of four nano-polysilicon thin film resistances fabricated on the silicon membrane of C-type silicon cup, and the resistances make up the Wheatstone bridge structure. The chip of sensor is fabricated by micro electromechanical system (MEMS) technology on a <100> silicon wafer. When supply voltage $V_{DD} = 5.0$ V, the sensitivity is 0.15 mV/kPa, and the accuracy is 0.39 %F.S.; tire pressure measurement can be realized. According to the characteristics of tire pressure sensors and the NRF24L01 wireless communication technology, the Tire Pressure Monitoring System (TPMS) is designed. By transmitting data timely through the wireless module, this system can realize the wireless and real-time monitoring, so as to ensure the safety of the vehicle.

Keywords

Nano-Polysilicon Thin Film Pressure Sensor, Tire Pressure Monitoring, MEMS Technology, TPMS

基于纳米多晶硅薄膜压力传感器胎压监测系统

赵小松, 于洋, 陈静, 赵晓锋*

黑龙江大学, 黑龙江省普通高等学校电子工程重点实验室, 黑龙江 哈尔滨

Email: 1085562584@qq.com, *zxf80310@126.com

*通讯作者。

收稿日期：2015年6月19日；录用日期：2015年7月7日；发布日期：2015年7月14日

摘要

本文给出纳米多晶硅薄膜压力传感器，由方形硅膜和四个纳米多晶硅薄膜电阻构成惠斯通电桥结构组成，采用MEMS技术在<100>硅片实现传感器芯片制作。当工作电压 $V_{DD} = 5.0$ V时，传感器灵敏度为0.15 mV/kPa，准确度为0.39 %F.S.，可实现轮胎胎压测量。根据胎压传感器特性和NRF24L01无线通信技术，实现胎压监测系统设计。通过无线模块实现实时数据传输，该系统可实现对轮胎胎压的实时监测，保证车辆安全。

关键词

纳米多晶硅薄膜压力传感器，胎压监测，MEMS技术，TPMS

1. 引言

汽车轮胎压力对于汽车的行驶安全尤为重要，特别是汽车高速行驶时，轮胎故障是驾驶员最担心、也是最难预防的问题之一。轮胎压力检测系统(Tire Pressure Monitoring System, TPMS)可以实时监控汽车在行驶过程中轮胎压力情况，保障汽车行驶安全，减少交通事故的发生。本文通过对纳米多晶硅薄膜压力传感器 [1] [2]静态特性的研究，设计并研制胎压监测系统，基于 NRF24L01 无线传输技术实现轮胎压力的无线监测，采用液晶屏直观显示监测数据 [3]-[7]。该胎压监测系统具有体积小、监测节点易于布设、数据传输方便稳定等优点，为纳米多晶硅薄膜压力传感器的进一步开发应用提供技术支持。

2. 纳米多晶硅薄膜压力传感器基本结构和工作原理

2.1. 纳米多晶硅薄膜压力传感器基本结构

图 1 给出纳米多晶硅薄膜压力传感器基本结构，该传感器采用 MEMS 技术和 CMOS 工艺在<100>晶向双面抛光单晶硅片上制作 C 型硅杯和纳米多晶硅薄膜压敏电阻，硅膜厚度(h)为 50 μm ，芯片厚度(H)为 550 μm ，硅膜面积为 $3.0 \times 3.0 \text{ mm}^2$ ，芯片面积为 $5.0 \times 5.0 \text{ mm}^2$ 。四个纳米多晶硅薄膜电阻(R_1 , R_2 , R_3 和 R_4)分别设计、制作在方形硅膜表面边缘中心位置并构成惠斯通桥结构，外加压力(P)垂直芯片表面。

2.2. 纳米多晶硅薄膜压力传感器工作原理

图 2 给出压力传感器等效电路图，外加胎压 $P = 0$ kPa 时，理想情况下，四个电阻阻值相等，

$$R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R_0 \quad (1)$$

惠斯通电桥桥路输出 V_{out} 等于两个半桥的输出电压之差，即

$$V_{out} = V_{out2} - V_{out1} = 0 \quad (2)$$

当外加胎压 $P \neq 0$ kPa 时，方形硅膜发生弹性形变，基于压阻效应，四个纳米多晶硅薄膜电阻阻值均随外加胎压的改变而改变， R_1 和 R_3 阻值增加， R_2 和 R_4 阻值减小，理想情况下，

$$\Delta R_1 = -\Delta R_2 = \Delta R_3 = -\Delta R_4 = \Delta R \quad (3)$$

惠斯通电桥输出电压 V_{out} 为：

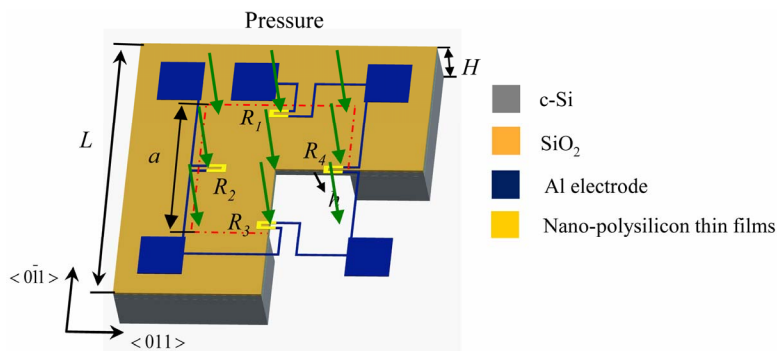


Figure 1. Basic structure schematic diagram of nano-polysilicon thin films pressure sensor

图 1. 纳米多晶硅薄膜压力传感器基本结构示意图

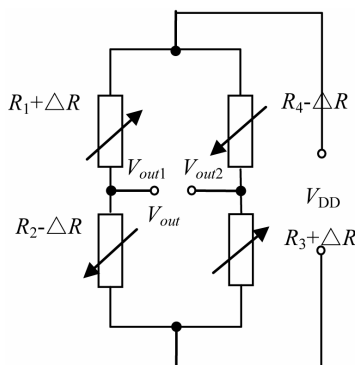


Figure 2. Equivalent circuit of nano-polysilicon thin films pressure sensor

图 2. 纳米多晶硅薄膜压力传感器等效电路

$$V_{out} = V_{out2} - V_{out1} = \frac{\Delta R}{R_0} \cdot V_{DD} \propto A \cdot P \quad (4)$$

式中， V_{DD} 为压力传感器工作电源电压， P 为外加胎压， A 为系数。

2.3. 纳米多晶硅薄膜压力传感器静态特性标定

本文基于 CMOS 工艺和 MEMS 技术，设计并研制纳米多晶硅薄膜压力传感器芯片。该传感器基于压阻效应，可以实现汽车轮胎胎压测量，图 3(a)、图 3(b) 分别给出压力传感器芯片正面和背面照片，图 3(c) 给出压力传感器芯片阵列。

在室温 20°C，相对湿度 30%RH 的环境下，本文采用压力校准计(福禄克 719 100G)、万用表(安捷伦 34401A)、恒压电源(PSW 80-13.5 型)对压力传感器进行静态特性标定，压力传感器工作电压分别为 3.0 V 和 5.0 V，量程为 0~400 kPa，步长为 40 kPa。图 4(a)~(c) 分别给出压力传感器输入-输出特性曲线、重复性曲线和迟滞性曲线。由实验结果给出，当 $V_{DD} = 5.0$ V 时，压力传感器灵敏度为 0.15 mV/kPa，线性度为 0.25 %F.S.，重复性为 0.19 %F.S.，迟滞性为 0.23 %F.S.，准确度为 0.39 %F.S.。经计算，传感器的拟合直线为 $y = 0.15x + 0.63$ 。

3. 轮胎压力监测系统设计与制备

3.1. 系统总设计方案

本文设计轮胎胎压监测系统框图如图 5 所示，由胎压传感器信号采集部分和信号接收端构成，基于

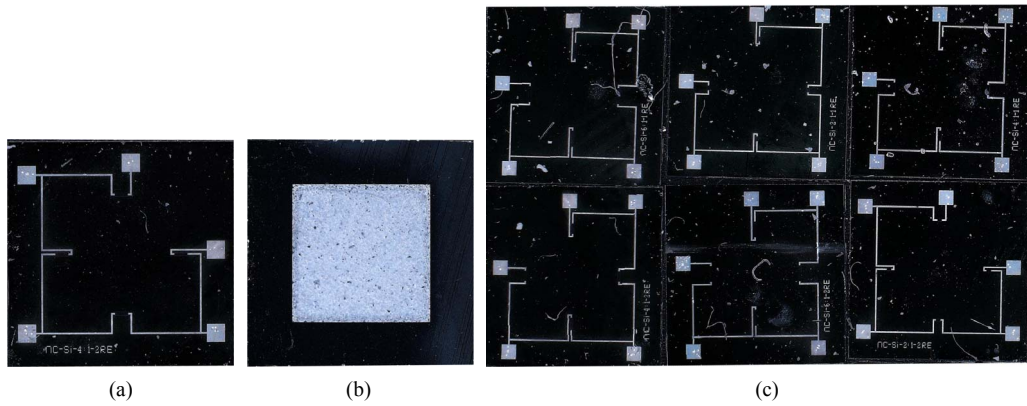


Figure 3. Photograph of nano-polysilicon thin film pressure sensor chips. (a) Front of the sensor chip; (b) Back of the sensor chip; (c) Array of the sensor chips

图 3. 纳米多晶硅薄膜压力传感器芯片照片。(a) 传感器芯片正面；(b) 传感器芯片背面；(c) 传感器芯片阵列

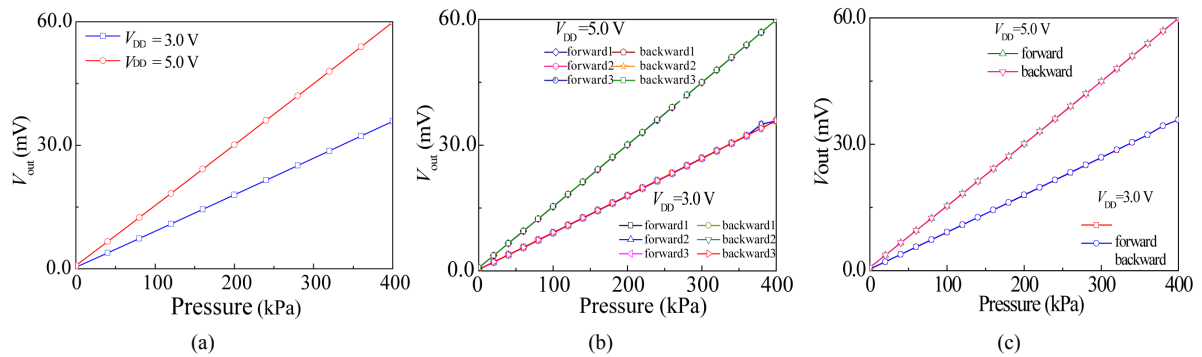


Figure 4. The static characteristics of the pressure sensor. (a) Input-output characteristics curves; (b) Repeatability curves; (c) Hysteresis curves

图 4. 压力传感器静态特性。(a) 输入 - 输出特性曲线；(b) 重复性曲线；(c) 迟滞性曲线

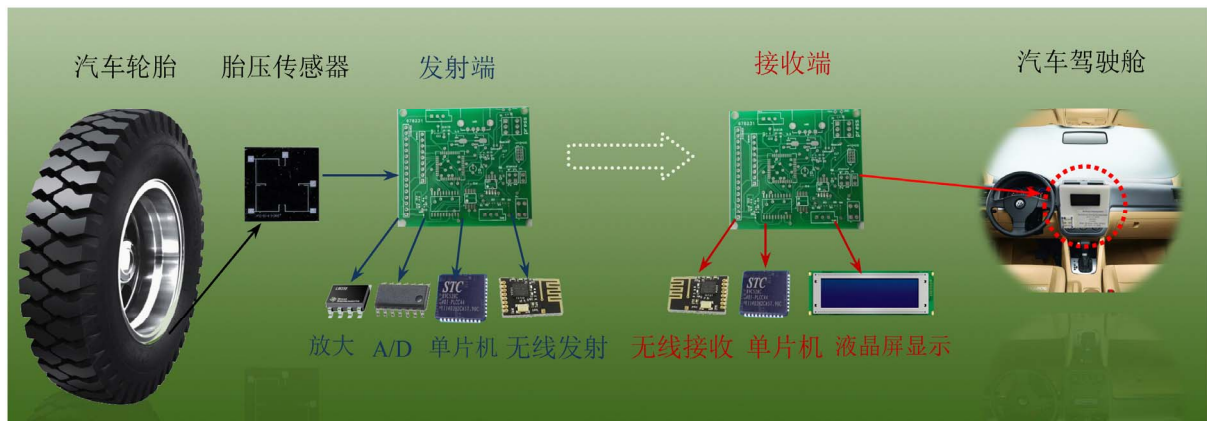


Figure 5. The system diagram of TPMS

图 5. 胎压监测系统示意图

纳米多晶硅薄膜压力传感器特性，采用差分放大电路芯片完成输出电压信号(V_{out})放大，通过单片机内部 A/D 模块处理，将电压信号转换为相应数字信号输出。根据胎压传感器输入 - 输出特性拟合直线方程，完成胎压传感器输出电信号(V_{out})与对应胎压压力值(P)转换，通过 NRF24L01 实现数据的无线传输，并能够在接收端显示屏或计算机上监测轮胎胎压，实现远程轮胎胎压实时检测。

3.2. 胎压监测系统硬件电路

图 6 给出胎压监测系统电路主要组成部分，该系统由电源电路、放大电路、单片机控制电路、无线传输模块和胎压信息接收端五个部分 [8]-[10]。根据电路设计并制作 PCB 版，采用贴片封装的方式进行电路的焊接，完成的电路如图 7 所示。

3.3. 胎压监测系统软件设计与调试

胎压监测系统主要包括：单片机程序设计和上位机显示界面程序设计，单片机程序实现包括单片机对模拟电压的采集、串口数据的接收与发送的功能；上位机显示界面程序用来显示胎压传感器对应的压力值。

采用集成开发环境进行单片机软件程序 [11] [12] 的设计，编译成功的程序生成相应的 HEX 文件，使用 USB-ISP 下载器可将 HEX 文件下载到单片机中运行，其程序主要包括单片机外部集成的 AD 执行程序程序和单片机串口数据通信程序。单片机 AD 执行程序包括 AD 初始化，设定采集通道、参考电压、中断方式、使能 AD 转化等操作。单片机串口数据通信程序包括串行 USART 初始化，设定波特率，设定数据帧结构，禁止 RXCIE、TXCIE、UDRIE 三个中断使能，使能接收和发送。系统程序整体流程如图 8 所示。本系统使用液晶屏显示接收到的胎压压力值。其过程包括串口初使化、发送字节地址数据、接收数据和数据处理显示。

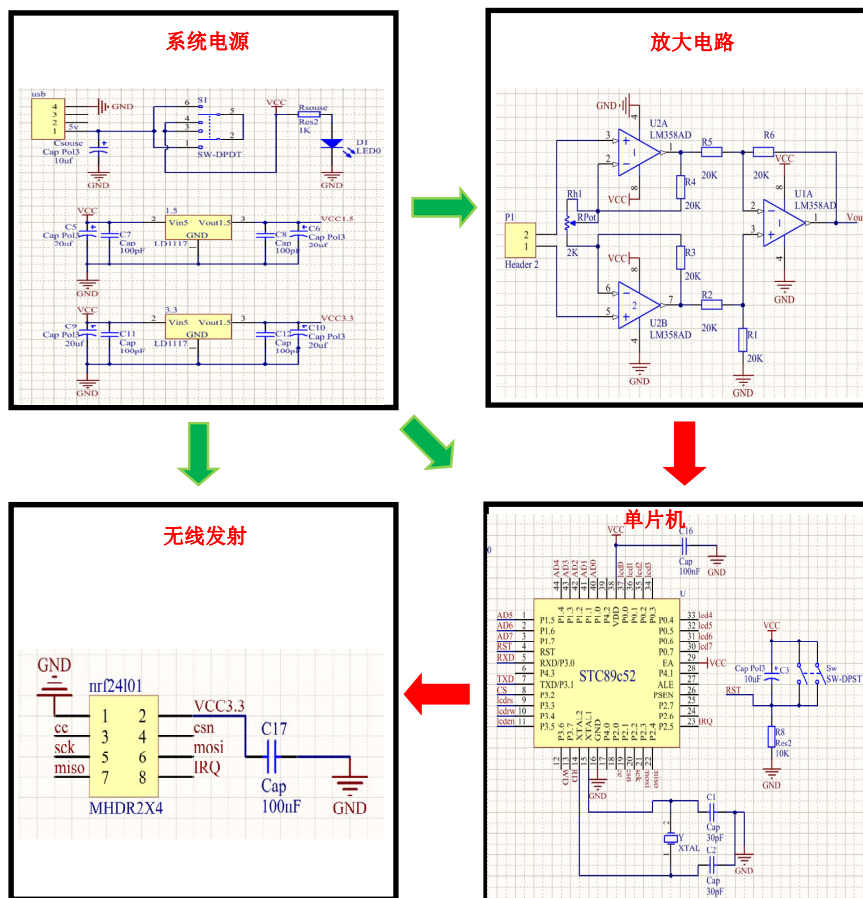


Figure 6. The circuit diagram of TPMS
图 6. 胎压监测系统电路图

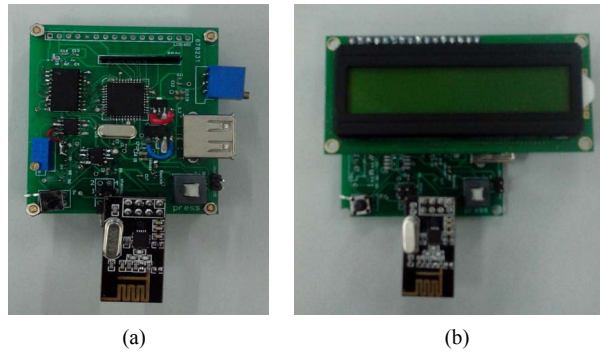


Figure 7. The photograph of TPMS. (a) Transmitting terminal; (b) Receive terminal
图 7. 胎压监测系统照片。(a) 发射端；(b) 接收端

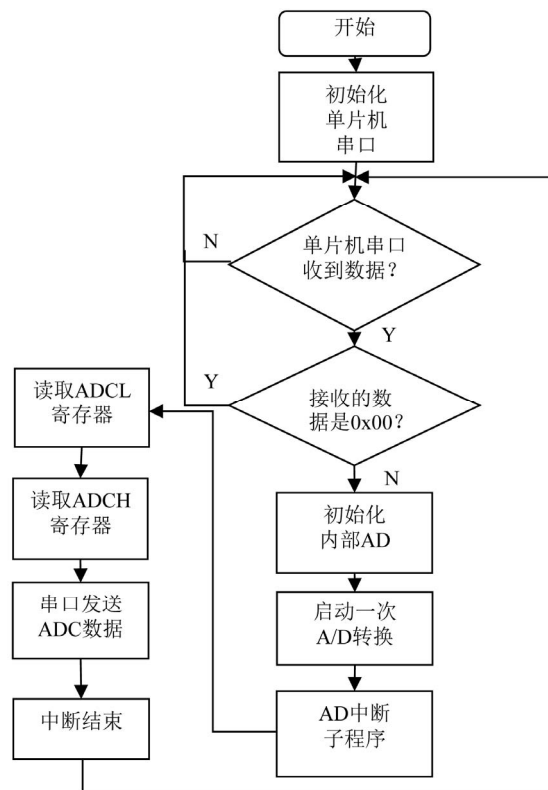


Figure 8. The program flow chart
图 8. 系统主程序流程图

4. 胎压监测系统测试结果

本文通过采用 3D 打印技术设计并制作胎压监测系统装置盒，使用移动电源为整个系统供电(工作电压为：5.0 V)。在室温条件下，本课题采用压力计(FLUKE719 100G)模拟轮胎压力环境，搭建胎压监测系统，如 图 9 所示，测试压力量程为 0~300 kPa，基于纳米多晶硅薄膜电阻胎压传感器输出信号由信号发射端采集，经过信号放大和模/数转换处理后，将电压信号转换成相应的压力值，通过无线发射模块，发射到信号接收端，在液晶屏上实时显示胎压。

对该系统进行标定，步长为 10 kPa，量程为 0~300 kPa，如 图 10 所示，标定结果给出在 50~250 kPa 之间，该系统可以较好的进行压力的测量并实时显示。

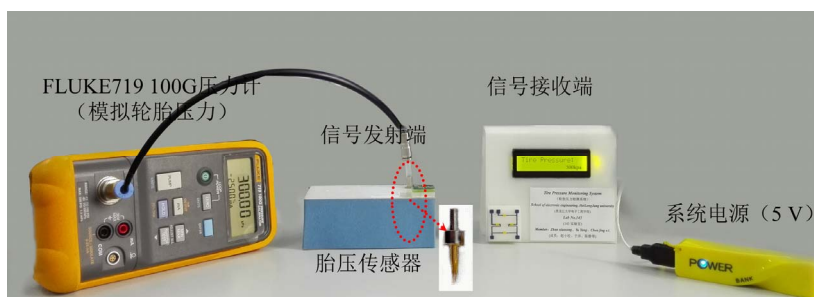


Figure 9. The photographs of the TPMS test system
图 9. 胎压监测系统测试图

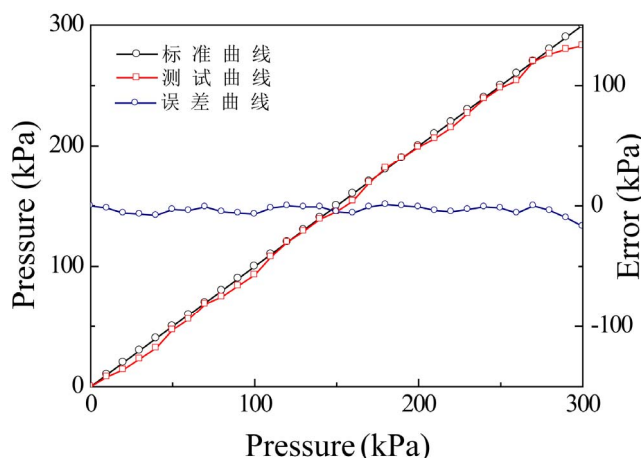


Figure 10. The relation curves between the output pressure and the standard pressure
图 10. 输出压力与标准压力关系曲线

5. 结论

本文给出纳米多晶硅薄膜压力传感器基本结构和工作原理，在此基础上设计、制作基于纳米多晶硅薄膜压力传感器轮胎压力监测系统。实验结果给出，该系统能够完成汽车轮胎胎压测量，具有低成本、温度特性好等优点，但系统存在一定误差，通过分析实验结果，主要原因为测试装置引起的误差。该系统 150~300 kPa 之间可以较好实现轮胎压力的监测，具有一定的应用背景与市场价值。

基金项目

国家大学生创新训练项目(201410212001)。

参考文献 (References)

- [1] 赵晓锋, 温殿忠 (2008) PECVD 法制备纳米晶粒多晶硅薄膜. *功能材料与器件学报*, **1**, 139-142.
- [2] 赵晓锋, 温殿忠 (2008) 纳米多晶硅薄膜压力传感器制作及特性. *半导体学报*, **10**, 2038-2039.
- [3] 谢医华 (2004) 多晶硅压力传感器的开发技术研究. 硕士论文, 暨南大学, 广州, 1-26.
- [4] 徐沙林 (2010) 基于 Modbus 协议的医用气体压力集散监测系统开发. 硕士论文, 南京理工大学, 南京, 1-4.
- [5] 刘友奇, 宋益东 (2007) ICL7660 芯片在 KJF2000 监控系统中的应用. *煤矿安全*, **4**, 48-50.
- [6] 华成英, 童诗白 (2006) 模拟电子技术基础. 高等教育出版社, 北京, 330-333.
- [7] 盛庆华, 袁路花, 闫云鹏, 等 (2013) 基于 24 位 AD 自然电位法海底探矿系统研究. *传感器与微系统*, **2**, 36-38.

-
- [8] Cuomo, F., Abbagnale, A. and Cipollone, E. (2013) Cross-layer network formation for energy-efficient IEEE 802.15.4/ZigBee Wireless Sensor Networks. *Ad Hoc Networks*, **11**, 672-686. <http://dx.doi.org/10.1016/j.adhoc.2011.11.006>
 - [9] Cuevas-Martinez, J.C., Canada-Bago, J., Fernandez-Prieto, J.A., et al. (2013) Knowledge-based duty cycle estimation in wireless sensor networks: Application for sound pressure monitoring. *Applied Soft Computing*, **13**, 967-980. <http://dx.doi.org/10.1016/j.asoc.2012.10.005>
 - [10] 王汉中 (2008) 基于 ZigBee 收发器 CC2430 的分布式温度测量系统的设计. 硕士学位论文, 华中师范大学, 武汉, 3-10.
 - [11] 孙丽晶 (2010) 基于 ICC AVR 和 Proteus 软件平台的 AVR 单片机设计开发流程. *吉林师范大学学报(自然科学版)*, **1**, 103-105.
 - [12] 王波 (2011) 基于 AVR 单片机的石灰乳配制及添加智能控制系统的研究. 硕士学位论文, 昆明理工大学, 昆明, 1-7.