

A CMOS Temperature Sensor Used in Passive RFID Tag*

LI Lei^{1,2}, XIE Sheng^{1*}, HUANG Xiaozong¹

(1. School of Electronic and Information Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;
2. School of Electronic and Information Engineering, Liaoning Technical University, Huludao Liaoning 125105, China)

Abstract: A temperature sensor used in passive RFID tag is implemented in SMIC 0.18 μm RF CMOS technology. Two kinds of delay elements are designed by making use of the current temperature effects of MOS transistor. On the basis of their compensation, a pulse with the width related to temperature is generated. A counter is utilized to convert the pulse to digital codes for RFID digital and control system. The simulation results show that the sensor can provide a resolution of 0.8 $^{\circ}\text{C}$ in the range from -20°C to 80°C . The working currents of the temperature sensor and the analog circuit in RFID tag are 440 nA and 5 μA respectively under supply voltage 1.8 V.

Key words: passive RFID tag; temperature sensor; threshold voltage; mobility

EEACC: 7230; 7320R

doi: 10.3969/j.issn.1004-1699.2010.08.011

应用于无源 RFID 标签的 CMOS 温度传感器*

李 蕾^{1,2}, 谢 生^{1*}, 黄晓综¹

(1. 天津大学电子信息工程学院, 天津 300072;
2. 辽宁工程技术大学电子与信息工程学院, 辽宁 葫芦岛 125105)

摘 要: 针对无源 RFID 标签功耗受限、芯片面积小的特点, 采用 SMIC 0.18 μm RF CMOS 工艺设计了一种温度传感器。利用 MOS 管沟道电流的温度特性, 设计了两种带有偏置电流源的延迟单元, 通过其相互补偿产生脉冲与温度相关以提取温度信息。设计了后续电路将提取的温度信息转换成数字信号供 RFID 标签数字控制模块使用。仿真结果表明, 当温度范围为 $-20 \sim 80^{\circ}\text{C}$ 时, 温度传感器精度为 0.8 $^{\circ}\text{C}$; 标签芯片供电电压为 1.8 V 时, 传感器芯片总的工作电流为 440 nA, 标签芯片模拟前端电路总工作电流为 5 μA 。

关键词: 无源 RFID 标签; 温度传感器; 阈值电压; 迁移率

中图分类号: TP212.11

文献标识码: A

文章编号: 1004-1699(2010)08-1098-04

随着大规模集成电路生产规模扩大、产品成本降低, 射频识别技术得以迅猛发展, 与其他技术结合产生更具有实用价值的新产品成为主流发展方向。射频识别 (RFID) 标签芯片与温度传感器结合, 可以有效利用 RFID 技术的无源特性及无线识别特性, 被医学、现代物流监控及食品安全监控等行业广泛采用。这使集成于 RFID 标签的温度传感器成为当前的研究热点。

已见报道的应用于 RFID 标签中的温度传感器多采用 ADC 结构^[1-3]。该结构传感器的优点在于精度高, 但是这通常要求 ADC 具有高输出位数, 并且结构中多应用大电容, 电路占用芯片面积大、功耗高。而对于无源 RFID 收发系统, 标签芯片的功率、面积有限, ADC 传感器结构并非与其相集成的最佳选择。文献

[4] 提出一种时间数字转换传感器结构, 该结构利用标准反相器的延迟时间与温度相关的特点提取温度信息, 结构简单便于在 RFID 标签中集成。但是在实际应用还存在一些问题需要改进。首先, 单纯依靠基本反相器结构的延迟时间提取温度信息, 精度较低; 其次, 文章利用 PMOS 管沟道电流的 ZTC (零温度系数) 点设计了一个温度补偿结构, 而实际中 PMOS 不易产生 ZTC 点^[5], 这为实际设计过程增加了难度。

针对上述问题, 设计了一种新型传感器。采用两种温度特性相反的延迟单元, 通过相互补偿使信号产生与温度相关的延迟, 将该延迟转换成脉冲以获取温度信息。设计了采样电路将温度信息转换成数字信号供系统的逻辑控制单元使用。其中延迟单元采用同种结构反相器, 利用偏置电流源为其提供

项目来源: 国家“863”计划重大项目资助 (2008AA04A102); 教育部博士点新教师基金资助 (200800561121)

收稿日期: 2010-02-05 修改日期: 2010-04-20

充电电流。根据 MOS 电子迁移率及阈值电压与温度的关系, 当电流源中各管的栅源电压被调节至不同值时, 偏置电流呈现不同的温度特性, 因此同种结构的反相器具有不同的延迟温度特性。

1 温度传感器结构及工作原理

温度传感器的系统结构如图 1 所示, 由温度脉冲转换模块、计数单元及内嵌低功耗振荡器组成。在工作时, 首先由数字逻辑单元发出上电复位信号至振荡器的 en_osc 端, 控制系统时钟开始工作。时钟工作后, 发出复位信号清空计数器, 同时发出使能信号输入温度脉冲转换模块的 en_temp 端, 控制其开始采集温度信息; 信息采集结束后, 温度脉冲转换模块输出含有温度信息的脉冲控制计数器开始工作, 计数器通过系统时钟对该脉冲采样计数; 计数过程结束后, 结果输入数字逻辑单元进行后续处理。计数单元采用 8 位异步计数器^[6], 该计数器电路结构简单, 使用元件较少, 适合于在 RFID 系统中应用。

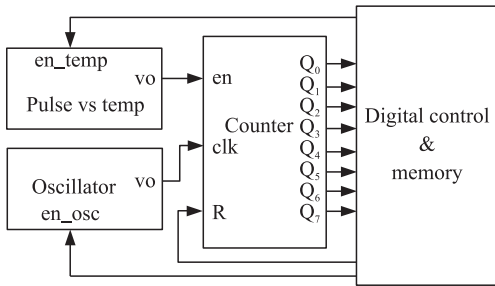


图 1 温度传感器系统结构

2 主要电路模块设计

2.1 内嵌低功耗振荡器

计数器的采样时钟采用系统时钟, 频率为 2MHz^[7]。基于系统设计难度和功耗的考虑, 振荡器采用片内结构, 要求输出频率精度满足偏差为 $\pm 15\%$, 抖动为 $\pm 2.5\%$ 。振荡器电路结构如图 2, 基于环形振荡器的原理, 采用两个完全相同的振荡电路进行补偿, 得到近似与电压无关的振荡器^[8]。其中 vctrl 和 vin 分别为 Cell_1 和 Cell_2 的控制端和输入端; vbp 与 vbn 为偏置电压输入端; 而 reset 为振荡器的工作控制端, 完成功耗管理分配功能。振荡器工作过程中 Cell_2 与 Cell_1 的延时分别决定了输出中“0”与“1”的长度, 因此要求 Cell_1 和 Cell_2 完全对称, 延迟相同, 使占空比精确相等。同时, 由于温度传感器对电路的温度特性要求严格, 因此, 作为计数器的采样时钟, 振荡器的输出频率应具有良好的稳定性, 不随温度及电源电压变化。图 3 为对振荡器输出特性的仿

真结果, 当电源电压 V_{DD} 在 1.6V ~ 2.0V 范围内变化时, 时钟频率偏差为 3%; 当 V_{DD} 为 1.8V 时, 温度在 $-20 \sim 100 \text{ }^\circ\text{C}$ 范围内变化时, 频率偏差为 0.75%。该结果表明振荡器的温度特性可以满足要求。

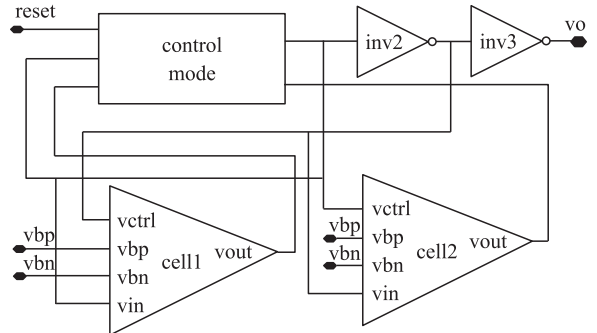


图 2 振荡器电路结构

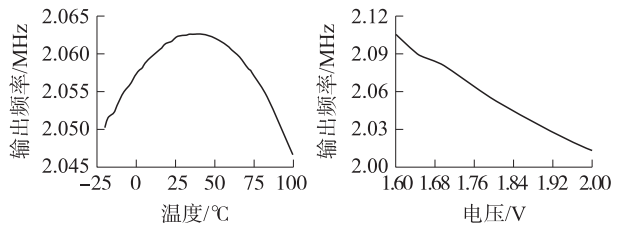


图 3 振荡器输出随温度和电压变化曲线

2.2 温度脉冲转换模块

温度脉冲转换模块的结构如图 4, 主要由与温度相关的反相器延迟单元与异或门电路组成。工作时该模块将数字逻辑单元提供的使能信号分成两路, 其中一路通过延迟单元输入至异或门, 该延迟单元的延迟时间与温度成正比; 另一路如果通过导线直接与异或门相连, 则结构简单易实现, 但是输出脉冲过宽, 而含有温度信息的量实际只占脉冲周期中一小部分, 这会导致计数器输出位数过多, 造成不必要的功耗。针对此问题, 设计了延迟时间与温度成反比的反相器, 使信号经该反相器输入至异或门的另一端。两种具有相反温度特性的反相器对两路信号的延迟作用互补, 使输出经异或后产生宽度与温度相关的脉冲。

两种延迟单元均由带有偏置电流源的反相器构成, 如图 5, 其中 P_1 、 N_2 、 N_1 、 P_3 及 N_3 管构成偏置电流源及电流镜, P_4 与 N_2 管为基本反相器。偏置电流为 P_1 、 N_1 及 N_3 沟道电流, 由于其采用二极管连接

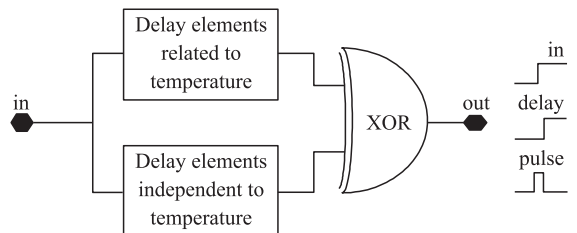


图 4 温度脉冲转换电路模块图

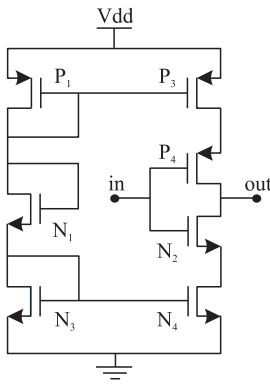


图 5 延迟单元基本电路结构

方式,则沟道电流可表示为:

$$I_D = \frac{\mu_n C_{ox} W}{2L} (V_{GS} - V_{TH})^2 \quad (1)$$

式中,宽长比 W/L 及栅氧化层电容 C_{ox} 与温度无关,而电子迁移率 μ_n 及阈值电压 V_{TH} 与温度相关,温度表达式为:

$$\mu_n(T) = \mu_n(T_0) (T/T_0)^{\alpha_u} \quad (2)$$

$$V_T = V_{T_0} - \alpha_{VT}(T - T_0) \quad (3)$$

其中 T_0 为参考温度, α_u 与 α_{VT} 为工艺常数,一般 α_u 在掺杂浓度 $N_A, N_D < 10^{12} \text{cm}^{-3}$ 时,对于 n 型硅和 p 型硅分别是 -2.4 和 -2.2 ,当掺杂浓度上升到 10^{17}cm^{-3} 时, α_u 增大为 -1.2 和 -1.9 ^[9];而 α_{VT} 通常介于 $-1 \sim -4 \text{mV}/^\circ\text{C}$ 之间^[10-11]。

将式(2)和式(3)代入式整理可得:

$$I_D = \frac{\mu_n(T_0) (T/T_0)^{\alpha_u} C_{ox} W}{2L} (V_{GS} - V_{T_0} + \alpha_{VT}(T - T_0))^2 \quad (4)$$

由于反相器延迟时间与温度成正比,则偏置电流随温度升高而减小,令 $\partial I_D / \partial T < 0$, 则有:

$$\frac{\mu_0 \cdot C_{ox} \cdot \alpha_\mu}{2T_0} \left(\frac{W}{L} \right) \left(\frac{T}{T_0} \right)^{\alpha_\mu - 1} [V_{GS} - V_T(T_0) - \alpha_{VT}(T - T_0)]^2 < \alpha_{VT} \cdot \mu_0 \cdot C_{ox} \left(\frac{W}{L} \right) \left(\frac{T}{T_0} \right)^{\alpha_\mu} [V_{GS} - V_T(T_0) - \alpha_{VT}(T - T_0)] \quad (5)$$

整理后,可得:

$$V_{GS} > V_T(T_0) + \alpha_{VT}(T - T_0) + 2 \frac{\alpha_{VT} T}{\alpha_\mu} \quad (6)$$

由式(6)可知,当 MOS 管的栅源电压 V_{GS} 大于一定值时,偏置电流值随温度增加而减小。同理,令 $\partial I_D / \partial T > 0$, 可得到:

$$V_{GS} < V_T(T_0) + \alpha_{VT}(T - T_0) + 2 \frac{\alpha_{VT} T}{\alpha_\mu} \quad (7)$$

即 V_{GS} 小于该值时,偏置电流值随温度增加而增大,反相器延迟时间与温度成反比。

由以上分析可知,通过调节偏置电流源中各管子的尺寸,将 V_{GS} 值调节至不同范围内,可改变偏置电流随温度的变化趋势,进而改变反相器延迟时间的温度特性。第三节给出 P_1, N_1 及 N_3 管的 W/L 设置为不同值时,对偏置电流温度特性进行仿真得到的结果,可进一步验证以上分析的正确性。延迟单元的整体电路结构如图 6,不计电容受温度的影响,信号经两路延迟单元后,输出进行异或得到脉冲,控制两个延迟单元中反相器的级数,使输出脉冲宽度随温度增加而减小。

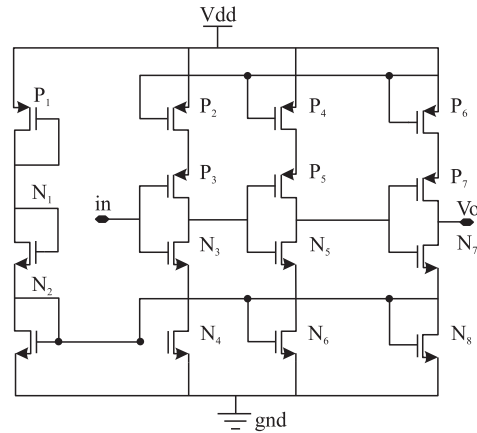


图 6 延迟单元整体电路结构

3 仿真结果与分析

采用 Cadencespectre 基于 SMIC 0.18 μm RF CMOS 工艺对图 5 所示的基本电路进行仿真。调节各器件参数,在 V_{GS} 大于或小于临界值情况下,得到的偏置电流温度特性曲线如图 7、图 8。图 7 中偏置电流随温度升高而减小并且在芯片工作的温度范围内可近似成线性关系,对其微分所得结果保持在 $-135 \times 10^{-3} \sim -125 \times 10^{-3} \text{nA}/^\circ\text{C}$ 范围内。同样对图 8 中温度特性曲线微分,结果在 $265 \times 10^{-3} \sim 310 \times 10^{-3} \text{nA}/^\circ\text{C}$ 范围内,其线性度可以满足要求。

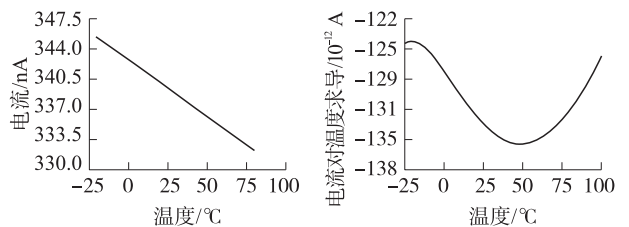


图 7 随温度减小的偏置电流温度特性曲线

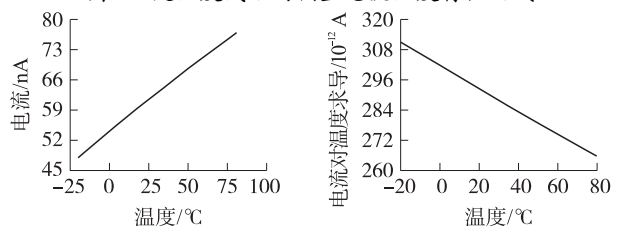


图 8 随温度增加的偏置电流温度特性曲线

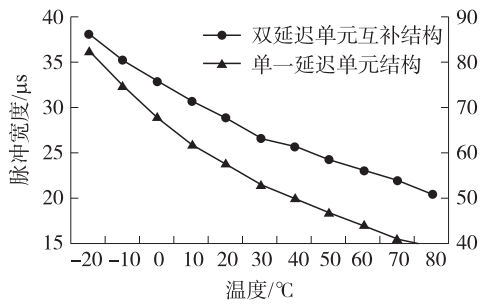


图 9 脉冲宽度与温度关系

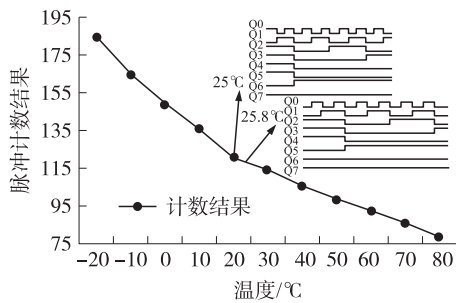


图 10 计数输出随温度变化曲线

对温度脉冲转换模块输出脉冲的宽度与计数单元的输出结果进行仿真,并对仿真输出结果进行统计,统计曲线如图 9、图 10。图 9 对本设计输出脉冲宽度与采用单延迟单元传感器输出脉冲宽度进行比较,前者脉宽跨度近 $20 \mu\text{s}$,后者为 $50 \mu\text{s}$,可见脉冲持续时间减小,并且与温度成近似线性关系。图 10 表明计数器输出与温度基本呈线性关系。且精度为 $0.8 \text{ }^\circ\text{C}$ 满足系统应用需求。

4 结束语

设计了一个应用于 RFID 标签中的温度传感器电路,利用 MOS 电子迁移率及阈值电压的温度特性设计了延迟时间与温度相关的延迟单元,使信号通过该单元产生延迟以提取温度信息。采用 Cadence-spectre 基于 SMIC $0.18 \mu\text{m}$ RF CMOS 工艺对电路进行仿真,仿真结果表明在 $-20 \text{ }^\circ\text{C} \sim 80 \text{ }^\circ\text{C}$ 之间,温度传感器输出结果与温度呈线性关系且精度为 $0.8 \text{ }^\circ\text{C}$;当供电电压为 1.8 V 时,温度传感器的总工作电

流为 440 nA ,标签芯片模拟前端电路消耗的总电流为 $5 \mu\text{A}$ 。

参考文献:

- [1] Cho Namjun, Song Seong-Jun, Kim Sunyoung, et al. A $5.1 \mu\text{W}$ UHF RFID Tag Chip Integrated with Sensors for Wireless Environmental Monitoring[C]//Laurent Fesquet, Andreas Kaiser, Sorin Cristoloveanu, eds. Solid-state Circuits Conference. Grenoble: 2005, 279 - 282.
- [2] Shen Hong-wei, Li Li-Lian, Zhou Yu-Mei. Fully Integrated Passive UHF RFID Tag with Temperature Sensor for Environment Monitoring[C]//Ting-Ao Tang, Satoshi Goto, Jason Cong, eds. Seventh International Conference on ASIC. Guilin: 2007, 849 - 852.
- [3] Kam Opasjummskit, Thaweesak Thanthipwan, Ohmmar Sathusen. Self-Powered Wireless Temperature Sensors Exploit RFID Technology[J]. IEEE Pervasive Computing, 2006, 5(1): 54 - 61.
- [4] Chen Chun-Chi, Liu An-Wei, Yu-Chi, et al. An Accurate CMOS Time-To-Digital-Converter-Based Smart Temperature Sensor with Negative Thermal Coefficient[C]//Andrei Shkel, Michiel Vellekoop, Sukhan Lee, eds. Conference on Sensors. California: IEEE, 2005, 849 - 852.
- [5] Filanovsky I M, Ahmed Allam. Mutual Compensation of Mobility and Threshold Voltage Temperature Effects with Applications in CMOS Circuits[J]. Transactions on Circuits and Systems 2001, 48(7): 876 - 884.
- [6] Cho Namjun, Song Seong-Jun, Lee Jae-Youl, et al. An $8 - \mu\text{W}$, $0.3 - \text{mm}^2$ RF-Powered Transponder with Temperature Sensor for Wireless Environmental Monitoring [C]//Nobuo Fujii, Rokuya Ishii, Ljiljana Trajkovic, eds. International Symposium on Circuits and Systems. Kobe: IEEE, 2005, 4763 - 4766.
- [7] Triet Le, Mayaram K, Fiez T S. Efficient Far-Field Radio Frequency Power Conversion System for Passively Powered Sensor Networks [C]//Henry Chang, Larry Wissel, Ann Riconl, eds. Custom Integrated Circuits Conference. California: IEEE, 2006, 293 - 296.
- [8] 木霄易. 超高频射频识别电子标签芯片模拟前端分析与设计[D]. 上海:复旦大学,2007.
- [9] Sze S M. Physics of Semiconductor Devices[M]. New York: Wiley, 1981.
- [10] Tsividis Y P. Operation and Modeling of the MOS Transistor[M]. New York: Mc Graw-Hill, 1994.
- [11] Laker K R, Sansen W M C. Design of Analog Integrated Circuits and Systems[M]. New York: McGraw-Hill, 1994.



李 蕾(1981 -),女,蒙,内蒙古霍林河市,博士研究生,主要研究方向为无线射频识别技术,lilei_81@163.com;



谢 生(1978 -),男,汉,河北省张家口市,博士,主要研究领域为半导体光电器件与射频集成电路设计。