

## A New CMOS Temperature Sensor Integrated in the Passive UHF RFID Tag\*

ZHANG Huan, MAO Luhong\*, WANG Qian, XIE Sheng, ZHANG Shilin

(Institute of Electronic and Information Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

**Abstract:** A new temperature sensor integrated in the passive UHF RFID tag is designed. Two currents with the opposite temperature coefficient are generated by making use of a cascode current mirror with high PSRR, to realize the supply voltage and temperature compensation. The pulse signal related to the temperature is generated by a similar differential architecture, it effectively overcomes the errors caused by process variation. The counting clock signal is provided by the local oscillator of the tag. And the oscillator frequency controlled by the bias current is approximately independent of the supply voltage and temperature. It is implemented in SMIC 0.18  $\mu\text{m}$  2P4M CMOS process, as shown in the simulation results, when the supply voltage is 1.8V and temperature ranges from  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$  to  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ , the bias current is 112nA, the oscillator frequency of the tag is 2MHz, and the temperature sensor achieves an effective resolution of  $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{LSB}$ , the working currents are 774nA.

**Key words:** passive RFID; temperature sensor; CMOS; effective resolution

EEACC: 7230; 7320R

doi: 10.3969/j.issn.1004-1699.2011.11.003

## 集成于无源 UHF RFID 标签的新结构 CMOS 温度传感器\*

张欢, 毛陆虹\*, 王倩, 谢生, 张世林

(天津大学电子信息工程学院, 天津 300072)

**摘要:** 设计了一种集成于无源 UHF RFID 标签芯片的新结构温度传感器。利用高 PSRR 共源共栅结构的电流镜偏置电路产生两路温度系数相反的电流, 实现了偏置电流对电源电压和温度补偿。与温度相关的脉冲信号由类似差分的结构产生, 有效的克服了工艺偏差导致的误差。计数时钟信号由标签内部振荡器提供, 振荡器频率受偏置电流控制近似与电源电压和温度无关。采用 SMIC 0.18  $\mu\text{m}$  2P4M CMOS 工艺, 仿真结果表明: 电源电压为 1.8V, 温度在  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$  ~  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$  变化时, 偏置电流为 112 nA, 标签提供的时钟信号频率为 2 MHz, 温度传感器有效分辨率为  $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{LSB}$ , 工作电流为 774 nA。

**关键词:** 无源 RFID; 温度传感器; CMOS; 有效分辨率

中图分类号: TP212.11

文献标识码: A

文章编号: 1004-1699(2011)11-1526-06

由于无源 UHF RFID 电子标签与其它频段标签相比具有工作距离远、成本低等优点, 被广泛应用于各个领域<sup>[1]</sup>。而内嵌温度传感器的无源 RFID 电子标签由于具有对温度良好的检测特性, 被广泛的应用于各个行业。因此内嵌温度传感器的无源 RFID 电子标签在近几年也成为人们研究的重点。由于无源 RFID 标签受工作距离和功率的限制, 使得内嵌的温度传感器对高精度、低功耗的要求也成为人们共同的研究方向和目标。

集成于无源 RFID 标签芯片的温度传感器传统上采用 ADC 结构<sup>[2-4]</sup>, 这种结构的温度传感器虽然精

度较高, 但是电路结构复杂, 占用芯片面积较大, 功耗也很大, 并不适合应用于无源 RFID 标签芯片中。而采用较新 TDC (time-to-digital converter) 结构的温度传感器<sup>[5]</sup>; 利用反相器延时结构产生一个与温度相关的脉冲信号, 再通过延时链结构将温度信息转化成数字信号输出; 或者利用两个完全相同的振荡器相互补偿的电路结构<sup>[6]</sup>, 产生一个近似与温度和电源电压无关的时钟信号作为计数信号, 也可以将温度信息转换成数字信号输出。这种 TDC 结构, 相比于传统 ADC 结构的温度传感器, 电路结构简单, 功耗大大降低, 精度也满足系统需求。但此种结构也存在着缺点: 反相

器延时单元温度特性不好,延时随温度变化不明显;计数信号需使用两个振荡器相互补偿产生,功耗较大,占用芯片面积较大。而基于 MOS 管阈值电压的温度特性设计的 CMOS 片上温度传感器<sup>[7]</sup>,由于 MOS 管阈值电压的工艺偏差较大,校准成本较高,也不适合集成于无源 RFID 标签中。

针对上述几种结构温度传感器的缺点,本文提出了一种新结构的温度传感器。基于 TDC 结构设计一个偏置电路产生正温度系数和负温度系数的两路电流,利用两路电流相反的温度特性得到两个温度特性相反的阶跃信号,异或产生与温度相关的脉冲信号。此种结构类似差分结构,能够有效的克服工艺偏差导致的系统误差。脉冲信号宽度随温度变化明显,温度特性较好。而利用两路温度系数相反的电流相互补偿,得到一与温度近似无关的偏置电流。计数信号直接由无源 UHF RFID 标签芯片内部振荡器提供,其频率受前面的偏置电流控制,近似与温度无关。这使得设计的温度传感器不需要额外的振荡器来提供计数信号,简化了电路,降低了芯片面积和功耗。设计的无源 UHF RFID 标签芯片内部振荡器采用锯齿波振荡器,其频率为 2MHz。从而实现了温度信息到数字信号的转换。

## 1 整体结构和工作原理

设计的温度传感器的系统结构如图 1 所示,主要由偏置电路、PTAT 和 NTAT 脉冲产生电路和一个 8 位异步计数器<sup>[8]</sup>组成。当系统工作时,首先由偏置电路产生温度系数相反的两路电流  $I_{ptat}$  和  $I_{ntat}$ ,以及不随温度变化的偏置电流  $I_{bias}$ 。 $I_{ptat}$  通过 PTAT 脉冲产生电路产生一个与温度正相关的脉冲信号  $P_p$ , $I_{ntat}$  通过 NTAT 脉冲产生电路产生一个与温度反相关的脉冲信号  $P_n$ 。 $P_p$  和  $P_n$  通过异或产生一个与温度相关的脉冲信号  $P_w$ ,其宽度与温度成正比例,接入计数器的使能控制端  $en$  来控制计数器的工作。偏置电流  $I_{bias}$  通过控制标签内部的振荡器产生一个稳定的时钟信号作为计数器的计数信号  $clk$ 。计数器的复位信号  $R$  在  $P_w$  之前由标签数字部分发送过

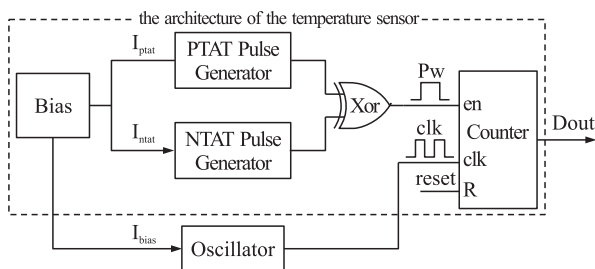


图 1 温度传感器整体结构

来,对计数器清零,保证计数正确。在  $P_w$  持续的时间内计数器进行计数,计数结束后,将结果  $D_{out}$  传送给标签的数字部分存储起来,需要的时候通过阅读器对其进行读取和后续处理。

## 2 主要模块的具体电路实现

### 2.1 偏置电路

偏置电路的结构如图 2 所示,  $M1 \sim M3$  构成启动电路,在上电过程中,起始  $M2$  栅极处于低电位,  $M3$  导通,对偏置电路注入电流,启动电路开启。随着  $V_{DD}$  逐渐升高,通过  $M1$  对  $M3$  充电,最终  $M2$  栅极达到高电位,  $M4$  截止,启动电路关闭,整个电路稳定工作。

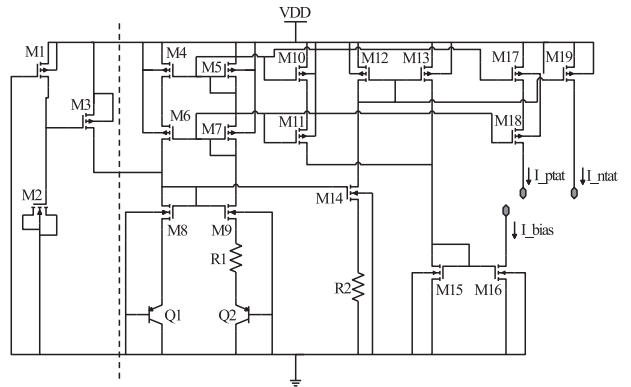


图 2 偏置电路结构

中间是偏置电路的核心部分,  $M4 \sim M7$  组成具有高 PSRR 的共源共栅电流镜结构,使得 2 支路电流相等基本不受电源电压影响。 $R_1$  和  $R_2$  采用 poly 电阻,温度系数近似为  $-2.16e-3/K$  可看做阻值基本不随温度变化。通过三极管  $Q_2$  的电流<sup>[9]</sup>

$$I_1 = \frac{V_T}{R_1} \ln \frac{I_{Q2}}{I_{Q1}} = \frac{V_T}{R_1} \ln n \quad (1)$$

其中  $V_T = kT/q$  是热电压,  $n$  为  $Q_2$  与  $Q_1$  发射极面积之比。由于  $V_T$  与温度成正比例,则  $I_1$  具有正的温度系数。 $M8$ 、 $M9$  和  $M14$  的栅极相连,使得  $M14$  与  $M8$  的栅极电压相等,从而  $R_2$  两端电压近似等于三极管  $Q_1$  发射极电压,即

$$V_{R2} = V_{BE1} \quad (2)$$

则流过  $R_2$  的电流

$$I_2 = \frac{V_{BE1}}{R_2} \quad (3)$$

由于  $Q_1$  发射极电压  $V_{BE}$  与温度成反比例,则  $I_2$  具有负的温度系数。通过  $M12$ 、 $M13$ 、 $M15 \sim M19$  组成的电流镜结构,得到

$$I_{ptat} = I_1 = \frac{V_T}{R_1} \ln n \quad (4)$$

$$I_{ntat} = I_2 = \frac{V_{BE1}}{R_2} \quad (5)$$

$$I_{bias} = I_{plat} + I_{ntat} = \frac{V_T}{R_1} \ln n + \frac{V_{BE1}}{R_2} \quad (6)$$

式(6)两边对温度求导得

$$\frac{\partial I_{bias}}{\partial T} = \frac{\partial I_{plat}}{\partial T} + \frac{\partial I_{ntat}}{\partial T} = \frac{\ln n}{R_1} \cdot \frac{\partial V_T}{\partial T} + \frac{1}{R_2} \cdot \frac{\partial V_{BE1}}{\partial T} \quad (7)$$

已知热电压  $V_T$  和三极管发射极电压  $V_{BE1}$  的温度系数<sup>[10]</sup>

$$\frac{\partial V_T}{\partial T} = 0.085 \text{ mV/K} \quad (8)$$

$$\frac{\partial V_{BE1}}{\partial T} = -2 \text{ mV/K} \quad (9)$$

通过合理的调节  $R_1$ 、 $R_2$  和  $n$ , 使得  $\frac{\partial I_{bias}}{\partial T} = 0$ , 得到

近似与温度无关的偏置电流  $I_{bias}$ 。而标签内部振荡器受  $I_{bias}$  控制, 其频率也近似与温度无关,  $f_{osc} = 2 \text{ MHz}$ 。

### 2.2 PTAT、NTAT 脉冲产生电路

PTAT 和 NTAT 脉冲产生电路采用近似一样的结构, 除了 NTAT 结构的  $C_0$  大一点, 其它部分完全相同。以 PTAT 为例说明, 如图 3 所示, 通过前面偏置电路提供的电流  $I_{plat}$  给电容  $C_0$  充电, 当  $C_0$  两端的电压达到反相器的阈值电压时, 反相器 1 输出端电位翻转, 由“1”变为“0”,  $M_0$  导通, 将反相器 1 输入端置“1”, 起到锁存的作用。从而反相器 2 输出端电位由“0”变为“1”, 得到 PTAT 脉冲信号  $P_p$ 。同理可得到 NTAT 脉冲信号  $P_n$ 。

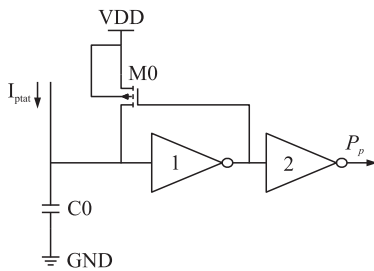


图3 PTAT 脉冲产生电路结构

此种脉冲产生电路与传统的单斜 ADC 结构<sup>[11]</sup>相比, 用反相器代替了比较器, 也不需要额外提供一个参考电流源  $I_{REF}$ , 电路结构简单, 有效的降低了电路整体的功耗和面积。而且两脉冲产生电路采用近似完全相同的结构, 使得电路结构简化, 更加易于实现。

### 2.3 振荡器

温度传感器的计数时钟信号由无源标签内部的振荡器产生, 设计的标签内部振荡器采用电流控制的锯齿波振荡器结构, 如图 4 所示, 控制振荡器频率

的电流  $I_{bias}$  由前面的偏置电路产生, 中间的 Com 模块是一个迟滞比较器。  $I_{bias}$  通过 M1 和 M2 组成的电流镜结构为以二极管方式连接的 M7 和 M9 提供传输电流, 从而为迟滞比较器提供一个比较电压  $V_{in+}$ ; 通过 M1 和 M4 组成的电流镜结构为迟滞比较器提供一个偏置尾电流  $I_{bias}$ 。然后  $I_{bias}$  通过 M1 和 M5 组成的电流镜结构, 由 M6 对电容 C 充电; 通过 M1 和 M3、M10 和 M11 组成的电流镜结构, 由 M8 为电容 C 放电。enable 通过控制 M12 的状态来控制振荡器的输出信号。M13 和 M15、M14 和 M16 组成的反相器结构为振荡器输出整理波形。电路开始工作时, 振荡器输出信号 out 为“0”, 其反馈到 M6 和 M8 组成的反相器的输入端, 于是 M6 导通, M8 截止,  $I_{bias}$  通过 M6 对电容 C 充电, 当电容 C 两端电压  $V_{in-}$  达到了迟滞比较器 Com 的正参考电压时, Com 输出端翻转, 由“0”变为“1”, 从而 out 由“0”变为“1”, 反馈回去, 于是又使得 M6 截止, M8 导通,  $I_{bias}$  通过 M8 对电容 C 放电, 当  $V_{in-}$  减小到 Com 的负参考电压时, Com 输出端翻转, 由“1”变为“0”, 从而 out 由“1”变为“0”。反复上述过程, 就得到了振荡信号 out。

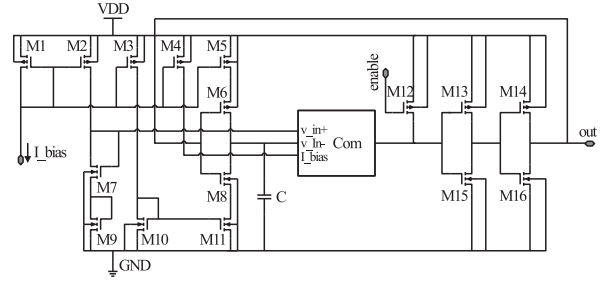


图4 振荡器电路结构

对电容 C 有

$$I_{bias} \cdot \Delta t = C \cdot \Delta V \quad (10)$$

其中  $\Delta t$  是电容  $C$  的充放电时间,  $\Delta V$  是电容  $C$  充放电电压差, 等于 Com 正负参考电压差, 即

$$\Delta V = V_{ref+} - V_{ref-} \quad (11)$$

则振荡器周期  $T$  为

$$T = 2\Delta t = \frac{2C \cdot \Delta V}{I_{bias}} = \frac{2C \cdot (V_{ref+} - V_{ref-})}{I_{bias}} \quad (12)$$

从上式可看出振荡器周期  $T$  仅受  $I_{bias}$  影响。

## 3 仿真结果和分析

整个温度传感器基于 SMIC 0.18  $\mu\text{m}$  2P4M CMOS 工艺, 在 spectre 环境下进行仿真。电源电压 VDD 为 1.8 V, 调整好各模块的器件参数, 当温度在  $-10 \text{ }^\circ\text{C} \sim 100 \text{ }^\circ\text{C}$  变化时, 对各个主要模块进行仿真。偏置电路仿真曲线如图 5、图 6 和图 7 所示, 可以看

出,在温度变化范围内,图 5 左图  $I_{\text{plat}}$  随温度线性增大,其对温度微分,得到右图,斜率保持在  $211 \times 10^{-3} \text{ nA}/\text{C} \sim 224 \times 10^{-3} \text{ nA}/\text{C}$  内,可见  $I_{\text{plat}}$  具有较好的线性度。同理可见图 6 中  $I_{\text{nat}}$  随温度线性减小,斜率保持

在  $-221 \times 10^{-3} \text{ nA}/\text{C} \sim 209 \times 10^{-3} \text{ nA}/\text{C}$  内,线性度较好;图 7 中  $I_{\text{bias}}$  保持在 112 nA,斜率保持在  $-30 \times 10^{-3} \text{ nA}/\text{C} \sim 10 \times 10^{-3} \text{ nA}/\text{C}$  内,近似为 0,可见  $I_{\text{bias}}$  具有较好的温度稳定性,基本不随温度变化。

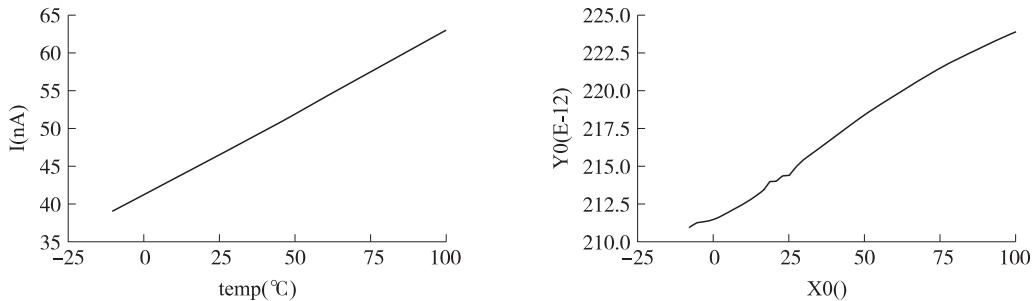


图 5  $I_{\text{plat}}$  温度特性曲线

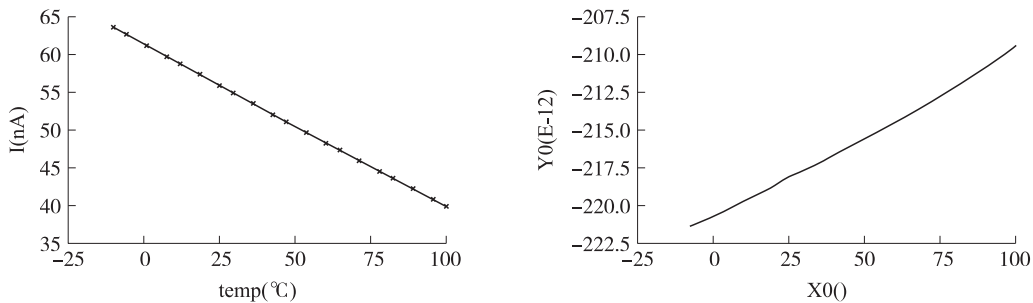


图 6  $I_{\text{nat}}$  温度特性曲线

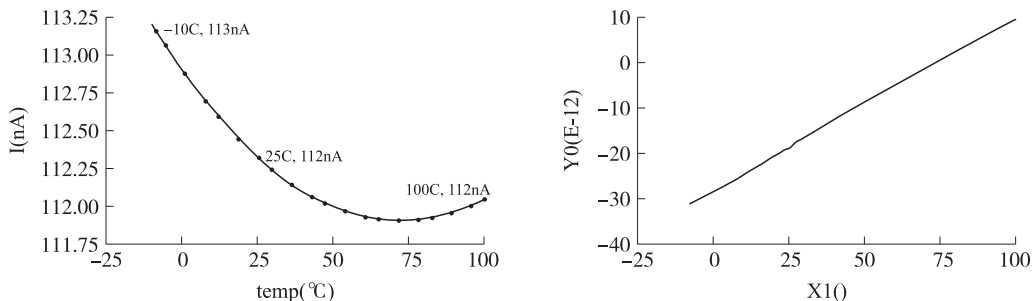


图 7  $I_{\text{bias}}$  温度特性曲线

标签内部振荡器随温度和电源电压变化的仿真曲线如图 8 所示,可以看出,左图中当 VDD 为 1.8 V,温度在  $-10 \text{ C} \sim 100 \text{ C}$  变化时,振荡器频率为 1.96 MHz  $\sim$  2.09 MHz,相对与 2 MHz 的中心频率,偏差为 0.13 MHz,仅变化 0.65%。右图中当 VDD 在 1.5 V  $\sim$  2.5 V 变化时,频率也稳定在 2 MHz 左右。可见,振荡器具有很好的对温度和电源电压的稳定性。

与温度相关的脉冲信号  $P_w$  和计数器数值输出 Dout 在 20 °C 时的仿真曲线如图 9 和图 10 所示。当温度在  $-10 \text{ C} \sim 100 \text{ C}$  变化时,仿真结果见表 1。

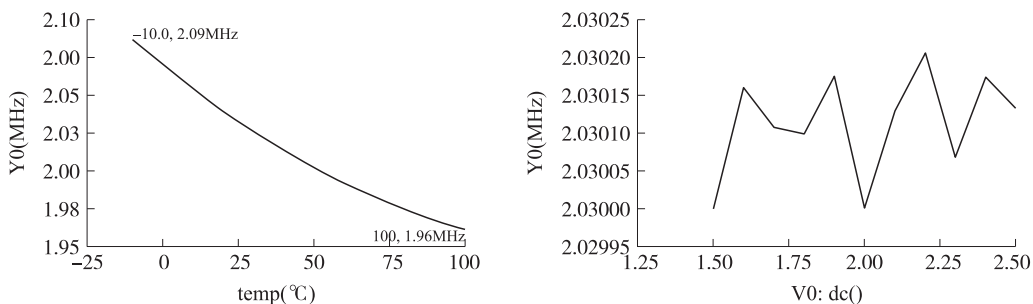


图 8 振荡器随温度和电源电压变化曲线

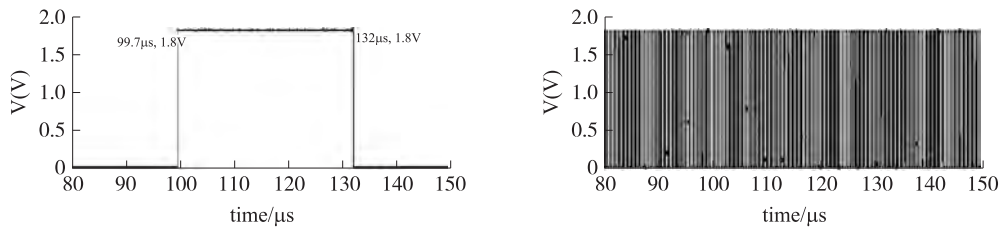


图9 P<sub>w</sub>和振荡器的仿真曲线

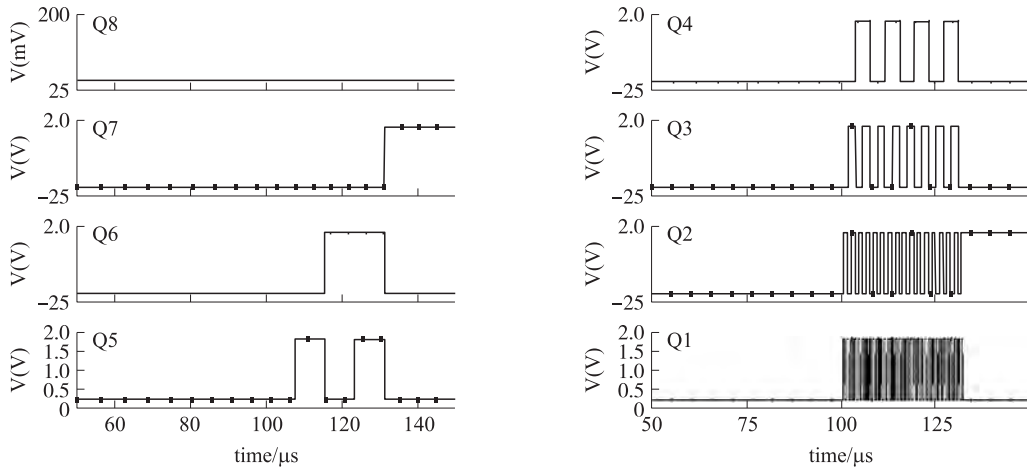


图10 Dout(Q<sub>8</sub>~Q<sub>1</sub>)的仿真曲线

表1 P<sub>w</sub>和Dout的仿真结果

温度/℃	P <sub>w</sub> /μs	Q <sub>8</sub> ~Q <sub>1</sub>	Dout
-10	2	00000101	5
0	13	00011011	27
10	23	00101110	46
20	35	01000010	66
30	43	01010110	86
40	52	01101001	105
50	61	01111100	124
60	71	10001111	143
70	82	10100011	163
80	92	10110111	183
90	104	11001100	204
100	114	11100010	226

当温度在-10~100℃变化时,温度传感器的数值输出Dout随温度变化的曲线如图11所示,可以看出温度传感器的数值输出与温度基本呈线性关系,线性度较好,Dout随温度线性增大。温度传感器的有效分辨率<sup>[12]</sup>定义为:

$$(T_{max}-T_{min})/(N_{Tmax}-N_{Tmin}) \quad (13)$$

从上式可知有效分辨率为

$$[100-(-10)]/(226-5)=0.5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{LSB} \quad (14)$$

温度传感器的数值输出与温度的关系近似为:

$$\text{Dout}=2T+25 \quad (15)$$

其输出灵敏度较高为2LSB/℃,可适用于无源UHF RFID标签芯片中。

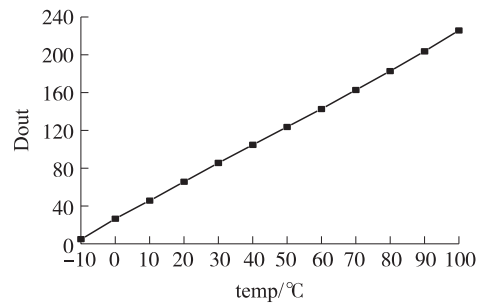


图11 温度传感器数值输出随温度的变化曲线

### 4 工艺分析

上述仿真结果是在典型工艺角下得到的,当工艺角发生变化时,电路中各器件的工作状态也随之改变,使得温度传感器的数值输出也发生变化。下面表2和表3分别是SS和FF工艺角下的仿真结果。

表2 Dout的仿真结果(SS)

温度/℃	-10	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Dout	7	18	39	58	77	96	115	134	154	175	197	220

表3 Dout的仿真结果(FF)

温度/℃	-10	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Dout	12	32	52	71	91	108	126	145	163	181	200	218

由(13)可知SS下的有效分辨率为

$$[100 - (-10)] / (220 - 7) = 0.52 \text{ } ^\circ\text{C} / \text{LSB} \quad (16)$$

以及 FF 下的有效分辨率为

$$[100 - (-10)] / (218 - 12) = 0.53 \text{ } ^\circ\text{C} / \text{LSB} \quad (17)$$

SS 和 FF 与典型工艺角下的仿真结果对比如图 12,可以看出 SS 低温时线性度略差些,FF 整体线性度较好。从整个温度变化范围来看,各个工艺角下的线性度都较好,灵敏度也较高,可应用于无源 UHF RFID 标签芯片中。

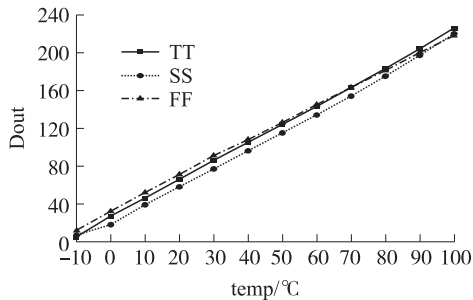


图 12 不同工艺角下温度传感器数值输出随温度的变化曲线

## 5 结论

本文设计了一个集成于无源 UHF RFID 标签芯片的新结构温度传感器,基于 SMIC 0.18  $\mu\text{m}$  2P4M CMOS 工艺,在 spectre 环境下对整个电路进行仿真。仿真结果表明:当温度在  $-10 \text{ } ^\circ\text{C} \sim 100 \text{ } ^\circ\text{C}$  变化时,温度传感器的数值输出与温度基本呈线性关系,且随温度线性增大。温度传感器的有效分辨率为  $0.5 \text{ } ^\circ\text{C} / \text{LSB}$ 。当电源电压 VDD 为 1.8 V 时,温度传感器的工作电流为 774 nA。设计的温度传感器电路结构简单,占用芯片面积小,功耗较低,同时分辨率和灵敏度较高,温度特性较好,满足无源 RFID 标签芯片系统要求。

### 参考文献:

[1] Zhou Shenghua, Wu Nanjian. A Novel Ultra Low Power Temperature

Sensor for UHF RFID Tag Chip [C]//IEEE Asian Solid-State Circuits Conference. Jeju: ASSCC, 2007. 464-467.

- [2] Hongwei Shen, Lilan Li, Yumei Zhou. Fully Integrated Passive UHF RFID Tag with Temperature Sensor for Environment Monitoring [C]//ASICON' 07. 7th International Conference. Guilin: ASIC. 2007. 360-363.
- [3] Kamran Souri, Kofi Makinwa. A 0.12  $\text{mm}^2$  7.4  $\mu\text{W}$  Micropower Temperature Sensor with an Inaccuracy of  $\pm 0.2 \text{ } ^\circ\text{C}$  ( $3\sigma$ ) from  $-30 \text{ } ^\circ\text{C}$  to  $125 \text{ } ^\circ\text{C}$  [C]//2010 Proceedings of ESSCIRC. Sevilla: ESSCIRC. 2010. 282-285.
- [4] Arbat A, Dieguez A, Samitier J. An Ultra Low Power Successive Approximation ADC with Selectable Resolution in 0.13 Mm CMOS Technology [C]//13th IEEE International Conference on Electronics, Circuits and Systems. Nice: ICECS. 2006. 415-418.
- [5] Poki Chen, Chun-Chi Chen, Chin-Chung Tsai, et al. A Time-to-Digital-Converter-Based CMOS Smart Temperature Sensor [J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2005, 40(8): 1642-1647.
- [6] 李蕾, 谢生, 黄晓综. 应用于无源 RFID 标签的 CMOS 温度传感器[J]. 传感技术学报, 2010, 23(8): 1099-1101.
- [7] 曹新亮, 余宁梅, 卫秦啸. 集成 CMOS 温度传感器设计、实现和测试[J]. 传感技术学报, 2010, 23(1): 38-42.
- [8] Namjun Cho, Seong-Jun Song, Sunyoung Kim, et al. A 8- $\mu\text{W}$ , 0.3- $\text{mm}^2$  RF-Powered Transponder with Temperature Sensor for Wireless Environmental Monitoring [C]//IEEE International Symposium on Circuits and Systems. Kobe: ISCAS, 2005. 4763-4766.
- [9] Conghui Xu, Peijun Gao, Wenyi Che, et al. An Ultra-Low-Power CMOS Temperature Sensor for RFID Applications [J]. Journal of Semiconductors, 2009, 30(4): 045003-1-4.
- [10] 李波, 吕坚, 蒋亚东. 一种基于 0.5  $\mu\text{m}$  CMOS 工艺的补偿型电流控制振荡器设计[J]. 电子器件, 2009, 32(1): 50-52.
- [11] Namjun Cho, Seong-Jun Song, Sunyoung Kim, et al. A 5.1- $\mu\text{W}$  UHF RFID Tag Chip Integrated with Sensors for Wireless Environmental Monitoring [C]//Proceedings of ESSCIRC. Grenoble: ESSCIRC. 2005. 279-282.
- [12] Man Kay Law, Amine Bernak, Howard C Luong. A Sub- $\mu\text{W}$  Embedded CMOS Temperature Sensor for RFID Food Monitoring Application [J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2010, 45(6): 1246-1255.



张 欢(1987-),男,硕士研究生,主要研究方向为模拟与射频集成电路设计,无源 UHF RFID 标签芯片中模拟和射频前端的研究与设计,zhanghuan\_8718@163.com;



毛陆虹(1955-)男,教授,博士生导师,主要研究方向为 UHF RFID 技术及应用,通信系统设计,射频集成电路设计(RFIC),光电集成电路(OEIC)。