

Design of New Low-Power Consumption on-Chip CMOS Temperature Sensor*

LIN Rong^{1,2}, CAI Min^{1*}, HUANG Weichao², LI Zhengping²

(1. School of Electronic and Information Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China;)
(2. Guangzhou Runxin Information and Technology Co., Ltd., Guangzhou 510663, China)

Abstract: In order to measure the temperature of the VLSI chip surface accurately, monitor the circuit work state and protect from over-heating, a new circuit configuration has been adopted to design the temperature sensor in this work. Firstly, the difference between the base-emitter voltage ΔV_{BE} of two bipolar transistors has a PTAT characteristics and such a characteristics can be used to measure the temperature. Secondly, the PTAT current from the bias circuit image can be used to control the three-order ring oscillator, so that an oscillating signal with the frequency in proportional to the temperature is generated. Finally, a digital circuit is used to measure the frequency and 8 bit digital data which represents the temperature. The sensor is designed by TSMC 0.13 μm CMOS process. The layout area is only 0.02 mm^2 . The power consumption is 0.3 μW (100 sample/S). The post-layout simulation result shows that the measure precision is ± 3.5 $^{\circ}\text{C}$ (after calibration) in the temperature range from -60 $^{\circ}\text{C}$ to 160 $^{\circ}\text{C}$. This temperature sensor has the merits of: low power, high precision and small layout area. The circuit will be used on the WiMAX/LTE Transceiver to measure the on-chip temperature.

Key words: CMOS; temperature sensor; low power consumption; transceiver; WiMAX/LTE

EEACC: 7230 doi:10.3969/j.issn.1004-1699.2011.07.010

新型低功耗 CMOS 片上温度传感器设计*

林 荣^{1,2}, 蔡 敏^{1*}, 黄伟朝², 李正平²

(1. 华南理工大学 电子与信息学院, 广州 510640;)
(2. 广州润芯信息技术有限公司, 广州 510663)

摘 要: 为了精确的测量超大规模集成电路芯片表面的温度, 监控电路工作状态和进行过热保护, 采用一种新型 CMOS 片上温度传感器结构。首先利用两个衬底 PNP 管的基-射电压差 ΔV_{BE} 的 PTAT 特性来感测温度, 然后利用偏置电路镜像过来的 PTAT 电流来控制一个三阶的环型振荡器, 产生频率与温度成正比的振荡信号, 再利用测频电路转化为 8 位数字。利用 0.13 μm CMOS 工艺设计, 版图面积仅为 0.02 mm^2 。功耗为 0.3 μW (100 sample/S)。后版图仿真结果显示, 在 -60 $^{\circ}\text{C}$ 到 160 $^{\circ}\text{C}$ 温度范围内的测量精度为 ± 3.5 $^{\circ}\text{C}$ (校准后)。该电路具有低功耗、高精度和芯片面积小等优点。该电路将用于 WiMAX/LTE 收发信机芯片上, 对芯片表面温度进行监控。

关键词: CMOS; 温度传感器; 低功耗; 收发信机; WiMAX/LTE

中图分类号: TP212.11

文献标识码: A

文章编号: 1004-1699(2011)07-0981-05

随着集成电路技术的发展, 集成度迅速提高, 芯片的热效应得到越来越多的关注和研究。各种系统芯片需要体积小、功耗低、性能可靠的片上温度传感器实时检测芯片表面温度变化。目前报道的使用 CMOS 工艺的测温方案有很多种^[1-3], 参考文献^[4]利用 CMOS 工艺的两个衬底三极管 (PNP) 的基-射电压差 ΔV_{BE} 的温度特性, 一个带隙基准电压和

$\Sigma-\Delta$ ADC 得到数字输出, 该文献报道在 -55 $^{\circ}\text{C}$ ~ 125 $^{\circ}\text{C}$ 温度测量精度可达 ± 0.1 $^{\circ}\text{C}$ (3σ), 但是该设计使用动态元件匹配、斩波放大器和 $\Sigma-\Delta$ DAC 减小误差, 而且利用二阶 $\Sigma-\Delta$ ADC 作为模数转换器, 电路结构复杂, 占用芯片面积大, 对于片上温度传感器来说, 这不是一种经济的方案。参考文献^[5-6]中采用了反相器链的延迟时间随温度变化的特性来测量温

项目来源: 国家高技术研究发展计划 (863 计划) 项目 (2009AA01Z260); 广东省科技计划项目 (2009A010100004)

收稿日期: 2010-12-15 修改日期: 2011-03-22

度,最后通过一个 TDC 得到被测温度的数字值,电路过于复杂,功耗也较高,不符合低功耗要求。参考文献^[7-9]中利用 MOS 晶体管的阈值电压的温度特性得到负温度特性电压,然后驱动一个 VCO,得出频率与温度成比例的振荡信号。但是晶体管的阈值电压的工艺偏差非常大,校准成本较高。

综合考虑阈值电压、迁移率和衬底三极管的感温原理,本文采取衬底 PNP 管的作为感温元件,这是工业界最成熟的、性能最可靠的感温器件。模数转换器由结构简单、性能稳定环形振荡器和数字测频电路组成。整个系统电路具有面积小、功耗低、结构简单的优点,满足测量精度($\pm 3.5\text{ }^\circ\text{C}$)和低功耗要求。

1 温度传感器的系统描述

本温度传感器由三个模块组成:PTAT 电流偏置电路;环形振荡器;数字测频和校准模块。如图 1 所示,PTAT 电路产生与温度成正比的电流 I_{PTAT} ,该电流镜像到环型振荡器的调谐电路中,控制振荡器的振荡频率,构成电流饥饿型 VCO,由此得到振荡频率与温度成正比的信号。数字测频和校准模块测量振荡信号的频率输出 8 位数字,在此添加了校准电路,减小工艺角对测量精度的影响。数字信号通过 SPI 输出到基带电路。

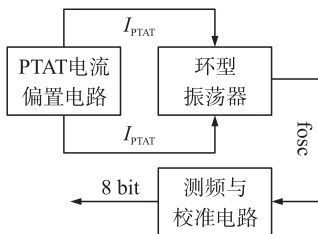


图 1 温度传感器系统示意图

2 温度传感器子模块的设计

2.1 PTAT 电流偏置电路的设计

为了得到与温度成正比的偏置电流,采取了工业界常用的两个衬底三极管 Q_1 、 Q_2 的基-射电压之差:

$$\Delta V_{BE} = V_{BE2} - V_{BE1} = \frac{KT}{q} \ln N \quad (1)$$

其中 N 是 Q_1 、 Q_2 晶体管发射极面积之比, K 为波尔兹曼系数, T 为绝对温度。由式(1)可知, ΔV_{BE} 与绝对温度 T 成正比^[5]。具体的电路结构图 2 所示, Q_1 的发射极面积是 Q_2 发射极面积的 8 倍,两个管子的发射极电流 $I_1 = I_2$,MP1、MP2、MP3 三个管子组成比例为 1:1:1 的电流镜,所以 $I_3 = I_1$ 。其中 I_3 镜

像到环型振荡器的控制电流,控制环型振荡器的振荡频率。

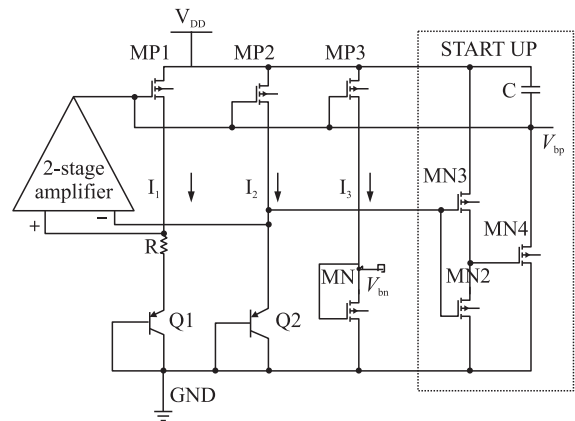


图 2 PTAT 电流偏置电路图

电路中的两级差分运放利用其反馈机制,保持运放输入端电压相同,为了减小运放的输入失调电压和减小电源电压对输出电流的影响,运放的直流增益要足够大,同时保证环路稳定^[10]。版图上的运放要考虑匹配,理想情况下运放输入两端电压相等。流过电阻 R 的电流大小为:

$$I_3 = I_1 = \frac{\Delta V_{BE}}{R} = \frac{KT}{Rq} \ln N \quad (2)$$

由式(2)可知,忽略电阻 R 的温度效应,输出电流 I_3 与温度成正比,影响电流 I_3 的非理想因素主要有运放的失调电压 V_{OS} 、电阻的工艺偏差 ΔR 、电流镜的失配 ΔI 。可以通过精心设计运算放大器以及在版图布局考虑匹配可以减小失调电压;也可以增加管子沟道长度和增大面积来减小电流镜的失配;最主要的误差来源与电阻的工艺偏差,在测频电路中增加了校准电路,可以减小电阻偏差带来的非理想效应。

该电路必须增加一个启动电路才能正常工作,如图 2 所示,启动电路由反相器和一个下拉管子组成,如果反相器设计恰当,假如初始状态电路不启动, $I_2 = 0$,则 $V_{BE2} = 0$,反相器的输出就为高电平,管子 MN4 导通,电流镜 MP1、MP2、MP3 栅极电压被拉为低,电流开始启动,当电路正常工作,反相器的输出电平低于 MN4 的阈值电压,则 MN4 关断,流过启动电路的电流为 0,不影响偏置电路的工作状态。

电路中的滤波电容 C 是为了避免后续电路引入干扰,抑制运放输出节点电压的波动,保证偏置电路的正常工作,该电容可能影响运放的稳定性,在设计运放时考虑该电容的负载效应。

2.2 环型振荡器的设计

环型振荡器把前面得到的与温度成正比的电流

转化为振荡频率与温度成正比的信号。环型振荡器有多种结构,都是由多个相同的延迟单元组成一个环路,延迟单元可分为单端反相器、差分反相器。环型振荡器的工作原理是使得环路传输函数仅在一个频率点上满足 Barkhausen 判据:

$$|T(\omega)| \geq 1 \quad (3)$$

$$\angle T(\omega) = 360^\circ \quad (4)$$

Barkhausen 判据仅是实现振荡器的必要条件,而不是充分条件,要形成环型振荡器,环路必须提供 180° 的直流相移和 180° 的交流相移, 180° 的交流相移所对应的频率即是振荡频率。因此如果延迟单元采取单端反相放大器结构,那么环型振荡器应由奇数个延迟单元组成,且级数至少为 3;如果延迟单元采取差分放大器结构,并且所有的延迟单元接成反相,则延迟单元应为不小于 3 的奇数;如果差分延迟中有一个单元接成同相形式,而其他单元接成反相形式,则延迟单元的数目为不小于 4 的偶数。

单端延迟单元的延迟时间容易受到电源电压噪声和衬底耦合噪声的干扰,而差分延迟单元则可以在一定程度上抑制这类共模噪声。考虑到本设计是片上温度传感器,在同一衬底上还有很多其他高频和数字模块,很容易引起共模噪声,所以采用差分延迟单元来抑制这类噪声。差分形式的环型振荡器的相位噪声和功耗随着级数的增加而增加,则环型振荡器采用图 3 的结构,由三级反相器延迟单元组成,其中 V_{bp} 、 V_{bn} 是从 PTAT 电流偏置电路镜像过来的栅极控制电压。

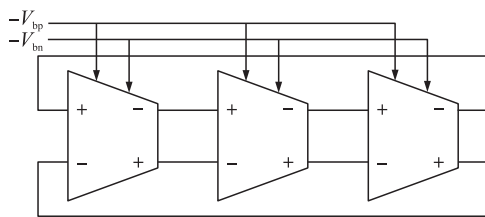


图3 电流控制环型振荡器结构图

环型振荡器中的延迟单元采取图 4 所示的新电路结构^[11],这是一种互补输入、互补输出、差分调谐的结构,由四个反相器组成,MP2、MN2 和 MP5、MN5 组成的两个反相器为常见的延迟单元结构,在信号路径上引入一定的延迟。MP3、MN3 和 MP4、MN4 组成的两个反相器构成一个锁存器,在状态发生转换时,在输出节点 V_{out}^+ 和 V_{out}^- 之间形成正反馈,加快转换速率,提高振荡器的相位噪声性能。这两个反相器的驱动强度设计为略高于主通道的反相器,因此转换的速率取决于这两个反相器,而与振荡频率关系不大。图 4 中差分控制电压 V_{bp} 、 V_{bn} 控制流过

MP1、MN1 的电流,进而对主通道上的反相器进行控制,位于锁存器环路之外,仅调谐延迟单元的延迟时间进而改变振荡器的振荡频率。不改变状态转换速率。

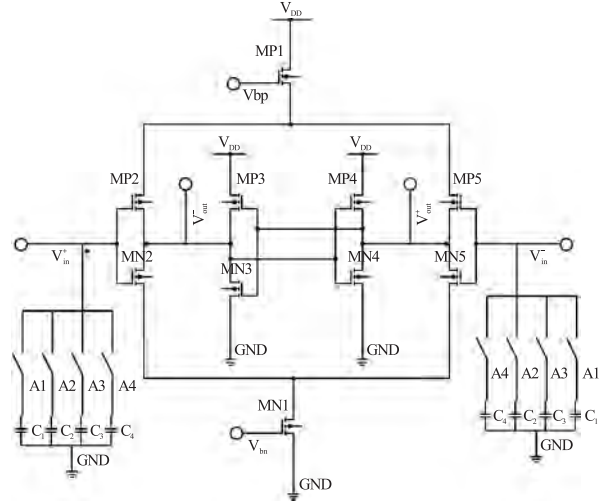


图4 环型振荡器中的延迟单元电路图

根据参考文献^[12],每级延迟单元的延迟时间为:

$$t_{\text{delay}} \approx C_{\text{load}} \cdot (V_H - V_L) / I_{\text{bias}} \quad (5)$$

则环型振荡器的振荡频率可由下面式子表示:

$$f = \frac{I_{\text{bias}}}{2 \cdot C_{\text{load}} \cdot M \cdot (V_H - V_L)} \quad (6)$$

上面两个式子中 t_{delay} 为每级延迟单元的延迟时间, M 为振荡器延迟单元的数目, $I_{\text{bias}} = I_3$ 为从 PTAT 电流偏置电路镜像到 MP1、MN1 的电流, C_{load} 为每级反相器的等效负载电容, $V_H - V_L$ 为输出电压摆幅。

把式(2)代入式(6),得到振荡信号频率和温度的近似关系:

$$f = \frac{K \cdot T \cdot \ln N}{2R \cdot C_{\text{load}} \cdot M \cdot (V_H - V_L)} = mT \quad (7)$$

其中 $m = \frac{K \cdot \ln N}{2 \cdot M \cdot R \cdot C_{\text{load}} \cdot (V_H - V_L)}$ 是与温度无关的常数,因此可以得到振荡频率与温度成正比的信号。

这部分电路的非理想效应主要是振荡器的相位噪声和电源电压对振荡信号摆幅的影响。需要减小相位噪声,可以通过提高振荡信号幅度和加快信号在上升沿与下降沿的转换速率,图 4 的电路中的锁存器起到了这样的作用,在两个输出之间形成正反馈,加快转换速率,能够提供从电源到地的全摆幅信号,还可以提供全差分信号输出。另外,利用片上的 LDO 电源,得到稳定的电源电压,减小电源电压对信号摆幅的影响。提高信号频率的稳定性。

2.3 数字测频与校准电路设计

测量频率方法采用同步测频法,如图 5 所示,利

用两个计数器,在被测信号上升沿到来的时候分别对 40 MHz 的基准时钟(片上系统提供)和被测信号的周期在规定的闸门时间进行计数,由下面公式:

$$f_x = \frac{N_x}{N_s} \cdot f_s \quad (8)$$

其中 f_x 为被测信号的频率值, f_s 是基准时钟的频率值。 N_x 是被测信号在闸门时间 N_s/f_s 里的周期数目, N_s 是在该闸门时间基准时钟的周期数目, N_s 的值由信号振荡频率与温度的关系决定, N_s 的计算公式:

$$N_s = \frac{f_s}{\partial f_x / \partial T} \quad (9)$$

其中,各参数与上文定义相同。确定了 N_s 、 f_s 和 $-60\text{ }^\circ\text{C}$ 时的 N_x 的值后, $N_x - N_{-60}$ 的值就代表了温度值。

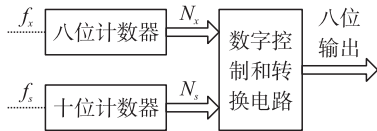


图5 数字测频电路示意图

为了消除工艺误差,提高测量精度,在环型振荡器的每一级延迟单元增加了校准电路,如图4所示。利用四位数字控制字 $A_4A_3A_2A_1$ 控制延迟单元的等效负载电容的大小,其中的校准电容具有二进制权值 $C_4=2C_3=4C_2=8C_1$,校准电容值由上述四位控制字调整大小,变化范围为 0 至 $15C_1$,步进为 C_1 。由式(7)可知,PTAT 电路中的电阻大小受工艺的影响,导致测量误差。这样调整环型振荡器延迟单元的等效负载电容,可以消除这种工艺误差。

3 仿真结果与分析

本电路利用 TSMC 0.13 μm CMOS 工艺,在 Cadence 仿真环境的 virtuoso 进行原理图和版图设计,版图布局如图6所示,面积仅为 0.02 mm^2 ,利用 Spectre 进行仿真,后版图仿真结果如图7、8、9所示。



图6 温度传感器版图

图7是PTAT电流偏置电路的输出电流随温度的变化关系,非线性为仅为1.6%。得到的输出电流与温度关系式:

$$I_3 = 0.046T(\mu\text{A}) \quad (10)$$

图8是环型振荡器输出信号振荡频率随温度的

变化关系,振荡频率与温度的关系为:

$$f = 0.04T - 3.59149(\text{MHz}) \quad (11)$$

其中 T 是绝对温度,偏置电流与温度成正比例关系,振荡频率与温度也保持良好的线性关系。

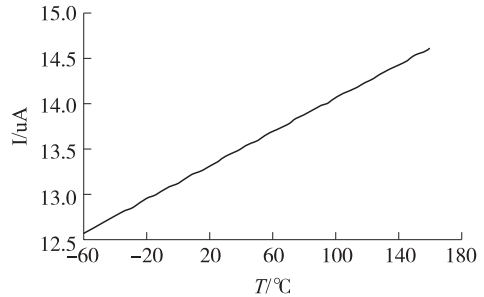


图7 偏置电路输出电流随温度的变化关系图

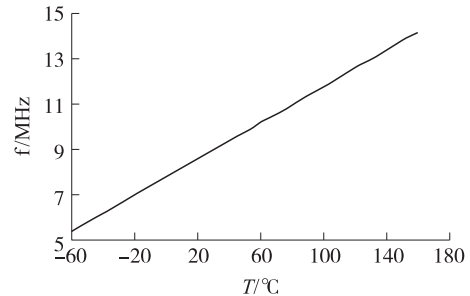


图8 振荡器输出信号频率随温度变化关系图

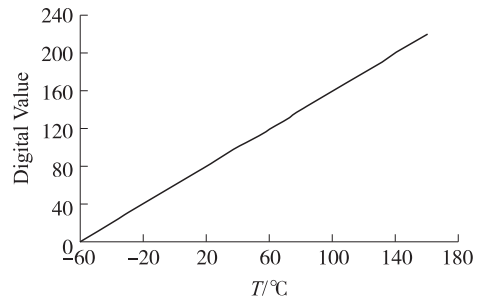


图9 数字输出值随温度变化关系图

图9为最后输出的八位无符号数代表的十进制值随温度变化的关系,线性度也很好。数值与温度的关系为:

$$D = T + 60 \quad (12)$$

其中 D 是输出数值, T 为摄氏温度,上述结果是在典型工艺角下的仿真图。其他工艺角通过校准可得到表1的结果。其中的误差来源于环型振荡器的相位噪声、校准电容的步进误差和传感器的自热效应,有待改进。

表1 温度传感器的性能参数

工艺	TSMC 0.13 μm CMOS 工艺
电源 (V_{DD})	1.2 V
温度范围	$-60\text{ }^\circ\text{C}$ 至 $160\text{ }^\circ\text{C}$
测量精度	$\pm 3.5\text{ }^\circ\text{C}$
功耗	$0.3\text{ }\mu\text{W}$ (100 sample/S, $27\text{ }^\circ\text{C}$)

4 结论

本文利用衬底三极管的基-射电压差的温度特性设计了基于环形振荡器的数字温度传感器,并提出了可行的校准方案。利用 TSMC 0.13 μm CMOS 1.2V 工艺设计,后仿真结果表明,本文提出的设计方案在在-60 $^{\circ}\text{C}$ 到 160 $^{\circ}\text{C}$ 温度范围内测量精度在 $\pm 3.5^{\circ}\text{C}$ 以内,具有精度高、功耗低、工作电压低、芯片面积小、测温范围广的特点。本电路很容易集成到 SOC 芯片上,为集成电路的温度测量和控制提供方便。

参考文献:

- [1] 林赛华,杨华中. 新型全 CMOS 片上温度传感器设计[J]. 半导体学报,2006,3:551-555.
- [2] 张询,王鹏,靳东明. 一种新型的 CMOS 温度传感器[J]. 半导体学报,2005,11:2202-2207.
- [3] 张艳红,刘兵武,刘理天,等. 一种新型硅基厚膜压力/温度传感器的设计和制作[J]. 传感技术学报,2006,19(6):2376-2379.
- [4] Pertijs M, Makinwa K, Huijsing H. A CMOS Smart Temperature Sensor With a 3σ Inaccuracy of 0.1 $^{\circ}\text{C}$ From 55 $^{\circ}\text{C}$ to 125 $^{\circ}\text{C}$ [J]. IEEE, J. Solid-State Circuit, 2005, 40(12):2805-2815.
- [5] Chen P, Chen C C, Tsa C C, et al. A Time-to-Digital-Converter-Based CM-OS Smart Temperature Sensor [J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2005, 40(8):1642-1648.
- [6] Woo K, Meninger S, Xanthopoulos T, et al. Dual-DLL-Based CMOS All-Digital Temperature Sensor for Microprocessor Thermal Monitorin-g [J]. IEEE, ISSCC, Microprocessor Technologies, 2009: 68-70.
- [7] Wang Nailong, Zhang Sheng, Zhou Runde. A Novel Built-in CMOS Temperature Sensor for VLST Circuits [J]. Chinese Journal of Semiconductors, 2004, 25(3):252-255.
- [8] 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.
- [9] 李蕾,谢生,黄晓综. 应用于无源标签的 CMOS 温度传感器 [J]. 传感技术学报,2010,23(8):1098-1101.
- [10] Razavi B. Design of Analog CMOS Integrated Circuits [M]. Los Angeles, University of California, 2002. 309-324.
- [11] 池保勇,余志平,石秉学. CMOS 射频集成电路分析与设计 [M]. 北京:清华大学出版社 2006. 367-453.
- [12] Sundaresan K, Allen P and Ayazi F. Proces and Temperature Compensation in a 7-MHz CMOS Clock Oscillator [J]. IEEE Journal of Solid State Circuits, 2006, 41(2):433-442.



林 荣(1985-),男,广西玉林人,硕士研究生,2008.07 毕业于南京邮电大学测控技术与仪器专业,2008.09 考入华南理工大学攻读“微电子学与固体电子学”专业硕士研究生,研究方向为 CMOS 模拟集成电路设计与系统集成;2009.07-2011.01 在广州润芯信息技术有限公司从事温度传感器设计和研究

工作, china.linrong@163.com;



蔡 敏(1955-),男,教授,博士生导师,于吉林大学半导体物理与器件专业,分别于 1982 年、1986 年与 1990 年获理学学士、硕士、博士学位。1982 年至 1983 年在东北微电子研究所工作;1990 年 3 月至今在华南理工大学任教。先后主持国家自然科学基金项目、广东省自然科学基金项目等项目 8 项。迄今,在国内外已发表论文 30 多篇,其中有 15 篇次被收入三大索引。

国内外已发表论文 30 多篇,其中有 15 篇次被收入三大索引。