

一种带有斜率补偿的片上温度检测电路*

郝强宇,王日炎,周伶俐,贺冀胤

(广州润芯信息技术有限公司,广东 广州 510700)

摘要:介绍了一种采用 $0.13\ \mu\text{m}$ CMOS 工艺制作的适用于片上集成电路的温度传感器。分析了核心模拟电路和温度检测原理,对参考电压进行了斜率补偿,以取得更准确的温度检测性能。样品电路测试表明,在 $-55\ ^\circ\text{C}\sim 125\ ^\circ\text{C}$ 范围内,温度检测结果与实际温度基本吻合。

关键词: 温度检测;斜率补偿;模拟集成电路

中图分类号: TN432

文献标识码: A

DOI: 10.16157/j.issn.0258-7998.200189

中文引用格式: 郝强宇,王日炎,周伶俐,等. 一种带有斜率补偿的片上温度检测电路[J]. 电子技术应用, 2020, 46(8): 80-82.

英文引用格式: Hao Qiangyu, Wang Riyan, Zhou Lingli, et al. An on-chip temperature sensor with slope compensation[J]. Application of Electronic Technique, 2020, 46(8): 80-82.

An on-chip temperature sensor with slope compensation

Hao Qiangyu, Wang Riyan, Zhou Lingli, He Hongyin

(Guangzhou Runxin Information Technology Co., Ltd., Guangzhou 510700, China)

Abstract: An on-chip temperature sensor based on $0.13\ \mu\text{m}$ CMOS IC process was presented. The core analog circuit and the principle of temperature sensing were analyzed. Slope compensation of reference voltage was used to obtain more sensing accuracy. The temperature sensor was fabricated, and test results showed that, in the range of $-55\ ^\circ\text{C}$ to $125\ ^\circ\text{C}$, the sensed temperature was basically in agreement with the actual temperature.

Key words: temperature sensor; slope compensation; analog IC

0 引言

集成电路对温度的变化十分敏感,不同的温度下芯片性能不同,过高的温度也会导致芯片永久损坏。为了解芯片所在环境和其内部的温度情况,需要温度检测电路,以进行相应的处理。但是,更多功能的增加会导致芯片面积和功耗的增加。因此,一个既简单易行又不失精确度的温度检测电路将是研究的重点。

最简单的电路^[1]是将温度电压与参考电压进行比较,超过阈值后关断电路。但随着集成电路复杂程度的增加,需要温度检测电路将温度转化为数字信号,来控制其他模块。采用斩波技术和 sigma-delta ADC 的温度检测电路^[2]具有最高的精度,但是其面积较大,不适合作为片上辅助功能电路使用;另一种结构^[3]使用与温度成正比(PTAT)振荡器,在不同温度下,产生不同频率的时钟信号,容易对其他电路产生影响,并增加系统杂散;使用亚阈值区 MOS 管产生 PTAT 电压的温度检测电路^[4]具有最小的面积和功耗,但是其线性度一般较差;文

献^[5]采用了 PTAT 电压、参考电压、比较器和数字电路的结构,具有适中的面积和精度,但其参考电压在通过数模转换器(DAC)改变时,温度补偿性能会变差。

1 温度检测电路的系统原理

本文介绍的温度检测系统如图 1 所示,由模数转换器、参考电压源、温度感应模块、比较器、数字电路组成。其中温度感应电路输出一种与温度成正比的电压(V_{PTAT});数模转换器接收数字电路产生的 $N\ \text{bit}$ 控制码,与参考电压源结合输出一系列不随温度变化的参考电

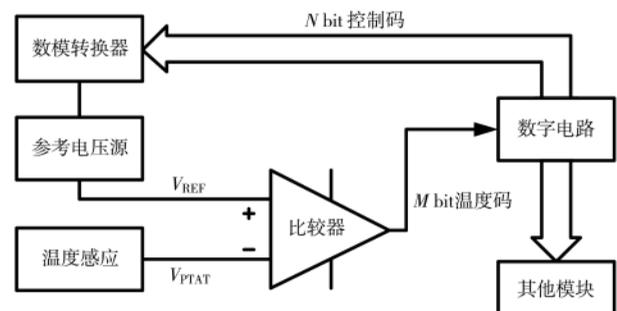
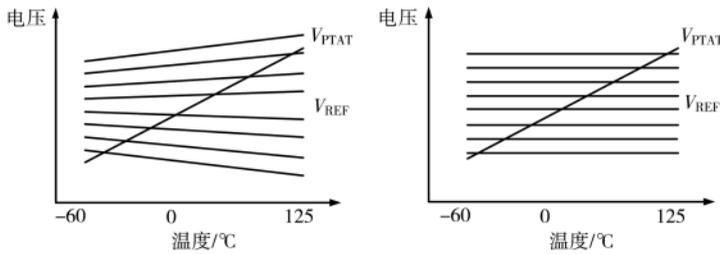


图 1 温度检测电路系统框图

* 基金项目: 广东省重大专项(2017B090908005); 广州市珠江新星专项(20170010072)

微电子技术 Microelectronic Technology

压 (V_{REF}), 将 PTAT 电压分为若干的区间, 如图 2(b) 所示; 比较器将 PTAT 电压和不同大小的参考电压进行依次比较, 输出逻辑信号给数字电路, 数字电路将逻辑信号编码为 M bit 温度码输出给芯片上其他电路。



(a) 文献[5]中电路的 V_{REF} 和 V_{PTAT} 曲线 (b) 本文电路的 V_{REF} 和 V_{PTAT} 曲线

图 2 PTAT 电压与参考电压随温度变化曲线

2 温度检测电路关键单元电路设计

2.1 一般温度检测电路结构

系统中数模转换器、参考电压源、温度感应电路、比较器为模拟部分, 一般温度检测电路结构如图 3 所示。其中左侧电路为带隙基准源, Q_1 、 Q_2 为两二极管连接形式匹配的 BJT, Q_1 面积为 Q_2 的 n 倍。利用在电流相同的情况下, 结面积不同的 PN 结电压差与温度成正比的原理, 在电阻 R_1 上形成了一个与温度成正比 (PTAT) 的电流, 并通过电流镜 M_1 、 M_3 放大 M 倍到电阻 R_2 上, 得到 PTAT 电压。 $I_1 \sim I_6$ 分别为 $M_1 \sim M_6$ 管的源漏电流, $V_{BE1} \sim V_{BE4}$ 分别为 $Q_1 \sim Q_4$ 管的基极与发射极之间的压差。

晶体管基极-发射极电压差为:

$$V_{BE} = \frac{kT}{q} \cdot \ln\left(\frac{I_0}{I_s}\right) \quad (1)$$

其中, k 是波尔兹曼常数, T 是绝对温度。 M_1 与 M_2 比例相同, OP 输入端电压相等, 因此:

$$I_1 R_1 + V_{BE1} = V_{BE2} \quad (2)$$

因此:

$$V_{PTAT} = M I_1 \cdot R_2 = M \cdot \frac{R_2}{R_1} \cdot \frac{kT}{q} \cdot \ln n \quad (3)$$

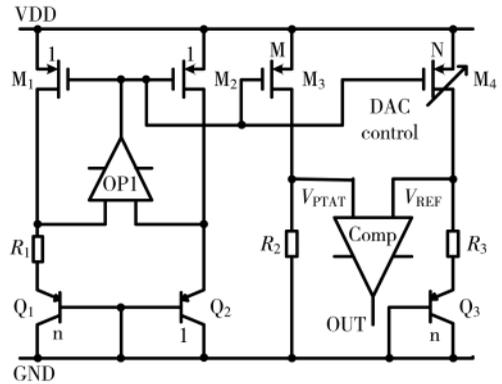


图 3 一般温度检测电路

将 PTAT 电流镜 M_1 、 M_4 放大 N 倍到电阻 R_3 和晶体管 Q_3 上, 由于晶体管的电压降 V_{BE} 为负温度系数, 通过适当设置参数, 可以得到一个不随温度变化的参考电压:

$$V_{REF} = N \cdot \frac{R_3}{R_1} \cdot \frac{kT}{q} \cdot \ln n + V_{BE3} \quad (4)$$

其中 M_4 为多个 PMOS 管并联, 并由数字信号控制开关导通与关闭。由式(4)可以看出, 参考电压的 PTAT 项受 M_4 管并联数目影响。 N 越大时, PTAT 项斜率越大; N 越小时, PTAT 项斜率越小。因此, 在负温度系数电压 V_{BE3} 保持不变时, 不能保证参考电压的温度补偿特性, 预期输出的参考电压如图 2(a) 所示。

2.2 带有斜率补偿的温度检测电路

为了解决上述一般温度检测电路中的参考电压 PTAT 项斜率问题, 本文提出了一种改进电路。如图 4 所示, 电路由两个带隙基准源分别产生 PTAT 电压和参考电压, 供比较器比较。其中一个带隙基准源可以与片上其他电路共用, 仅用电流镜复制一路电流输出, 不占用额外的片上面积。

PTAT 电压与式(3)相同, 而参考电压产生同理。由于 M_5 与 M_6 比例相同, OP2 输入端电压相等, 可得 M_5 管电流为:

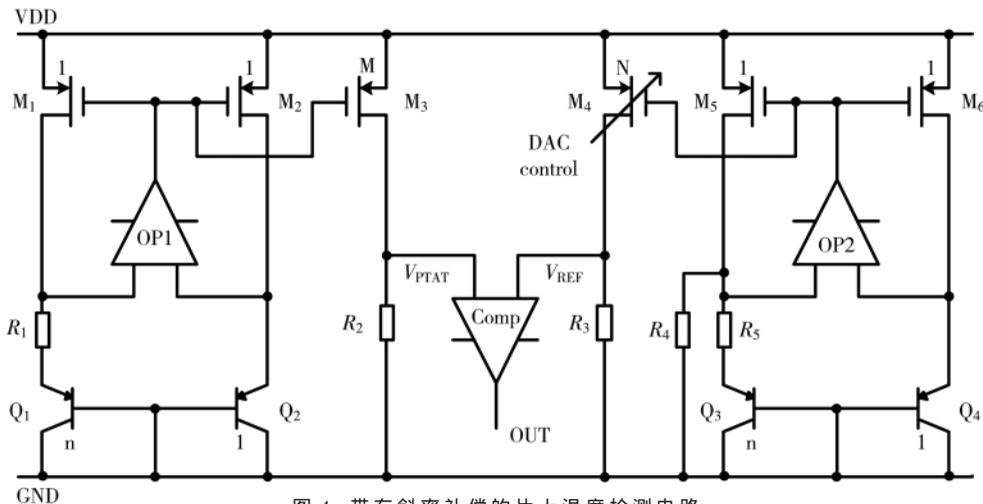


图 4 带有斜率补偿的片上温度检测电路

$$I_5 = \frac{V_{BE4} - V_{BE3}}{R_5} + \frac{V_{BE4}}{R_4} \quad (5)$$

结合式(1)可得:

$$V_{REF} = N \cdot \left(\frac{R_3}{R_5} \cdot \frac{kT}{q} \cdot \ln 2 + \frac{R_3}{R_4} \cdot V_{BE4} \right) \quad (6)$$

可以看出,式中 PTAT 项不再受由 DAC 控制的电流镜比例 N 影响。因此,只要将括号内的 PTAT 电压和负温度系数电压匹配,就可以得到一系列温度系数较好的参考电压,如图 2(b)所示。

3 电路仿真和测试结果

电路在 $0.13 \mu\text{m}$ CMOS 工艺下设计、仿真,可以在 $-55 \text{ }^\circ\text{C} \sim 125 \text{ }^\circ\text{C}$ 温度范围内实时检测芯片温度,并输出 4 bit 温度码,以供芯片上其他电路使用。值得提出的是,检测电路精度设置为 4 bit 已能够满足本芯片的温度补偿,其他场合可以适当提高检测精度。电路工作电压为 $1.8 \text{ V} \sim 3.6 \text{ V}$,典型工作电流为 $55 \mu\text{A}$ 。

图 5 为温度检测电路的版图,图中只截取了整个射频芯片的小部分电路。上半部分包括了温度感应电路、比较器和数模转换器,面积为 0.03 mm^2 ;下半部分为片上带隙基准源和各个模块的 PMOS 电流镜,面积为 0.066 mm^2 ,给芯片其他电路提供参考电压和参考电流,仅从其中复制一路电流供温度检测电路使用。

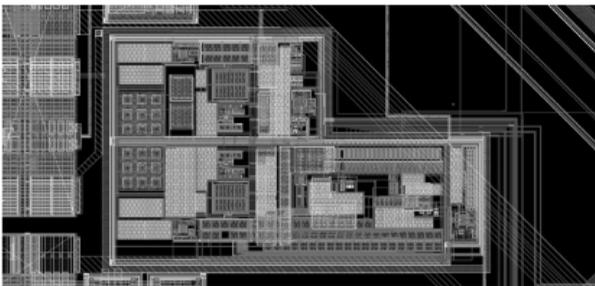


图 5 温度检测电路版图

本文与文献中温度检测电路对比见表 1。可以看出本文提出的温度检测电路具有面积小、功耗低等特点,适合应用于片上集成电路的温度检测。

表 1 本文与文献中温度检测电路对比

参数	文献[2]	文献[5]	本文
CMOS 工艺/ μm	0.7	0.065	0.13
电源电压/V	2.5~5.5	N.A.	1.8~3.3
面积/ mm^2	4.5	N.A.	0.3
温度范围/ $^\circ\text{C}$	-55~125	10~90	-55~125
分辨率/ $^\circ\text{C}$	0.01	1	20
静态电流/ μA	75	N.A.	55

流片测试结果如图 6 所示,测试温度范围在 $-55 \text{ }^\circ\text{C} \sim 125 \text{ }^\circ\text{C}$ 。测试结果与实际温度基本吻合,温度误差小于 $1.9 \text{ }^\circ\text{C}$ 。提供的 9 挡温度码,能够满足射频芯片通道增益在温度范围内变化小于 $\pm 2 \text{ dB}$ 。

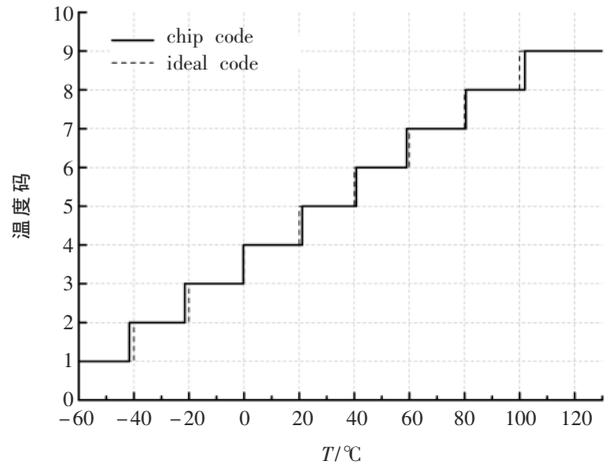


图 6 温度检测电路测试结果

4 结论

本文介绍了一种片上温度检测电路,具有结构简单、工作电压范围大、功耗低等特点,并对比较器的输入端的参考电压进行了斜率补偿。电路在 $0.13 \mu\text{m}$ CMOS 工艺下流片,测试结果与实际温度基本吻合。电路在 $-55 \text{ }^\circ\text{C} \sim 125 \text{ }^\circ\text{C}$ 温度范围内工作,功耗为 $55 \mu\text{A}$,面积为 0.03 mm^2 ,采用 4 bit DAC,输出 9 挡温度码,已能够充分完成对该芯片的温度检测和其他电路的保护校准功能。

参考文献

- [1] Zhang Bin, Feng Quanyuan. A novel thermal-shutdown protection circuit[C]. 2009 3rd International Conference on Anti-counterfeiting, Security, and Identification in Communication. Hong Kong, China, 2009.
- [2] PERTIJS M, MAKINWA K, HUIJSING J. A CMOS smart temperature sensor with a 3σ inaccuracy of $\pm 0.1 \text{ }^\circ\text{C}$ from $-55 \text{ }^\circ\text{C}$ to $120 \text{ }^\circ\text{C}$ [J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2005, 40(12): 2805-2815.
- [3] Zhang Qi, Feng Peng, Zhou Shenghua, et al. A novel RFID tag chip with temperature sensor in standard CMOS process[C]. Proceedings of 2010 IEEE International Symposium on Circuits and Systems. Paris, France, 2010: 1109-1112.
- [4] TSAI J T, CHIU H. High linear voltage references for on-chip CMOS smart temperature sensor from $-60 \text{ }^\circ\text{C}$ to $140 \text{ }^\circ\text{C}$ [C]. 2008 IEEE International Symposium on Circuits and Systems. Seattle, WA, USA, 2008: 2689-2692.
- [5] DUARTE D E, GEANNOPOULOS G, MUGHAL U, et al. Temperature sensor design in a high volume manufacturing 65nm CMOS digital process[C]. 2007 IEEE Custom Integrated Circuits Conference. San Jose, CA, USA, 2007: 221-224.

(收稿日期: 2020-03-15)

作者简介:

郝强宇(1989-),通信作者,男,硕士,主要研究方向:模拟集成电路设计, E-mail: haoqy@runxinic.com。

版权声明

经作者授权，本论文版权和信息网络传播权归属于《电子技术应用》杂志，凡未经本刊书面同意任何机构、组织和个人不得擅自复印、汇编、翻译和进行信息网络传播。未经本刊书面同意，禁止一切互联网论文资源平台非法上传、收录本论文。

截至目前，本论文已经授权被中国期刊全文数据库（CNKI）、万方数据知识服务平台、中文科技期刊数据库（维普网）、DOAJ、美国《乌利希期刊指南》、JST 日本科技技术振兴机构数据库等数据库全文收录。

对于违反上述禁止行为并违法使用本论文的机构、组织和个人，本刊将采取一切必要法律行动来维护正当权益。

特此声明！

《电子技术应用》编辑部

中国电子信息产业集团有限公司第六研究所