

与绝对温度成正比 BiCMOS 集成温度传感器设计

王进军^{1,2}, 王 侠³

(1. 陕西科技大学 电气与信息工程学院, 陕西 西安 710021; 2. 西安交通大学 电子与信息工程学院, 陕西 西安 710049;

3. 西安科技大学 电气与控制工程学院, 陕西 西安 710054)

摘 要:利用工作在弱反型区 MOS 管饱和漏电流的指数特性,设计了一款与绝对温度成正比(PTAT)BiCMOS 集成温度传感器,主要电路由 PTAT 电流产生电路、启动电路和输出电路 3 部分组成,电路结构简单,体积小。测试结果表明,该温度传感器的精度小于 0.5 °C,线性度小于 0.65%,灵敏度为 2.5 $\mu\text{A}/^\circ\text{C}$,芯片面积为 150 $\mu\text{m} \times 75 \mu\text{m}$,具有线性度及灵敏度高的优点,可广泛应于各类便携式电子产品中。

关键词:集成温度传感器;绝对温度成正比;BiCMOS

中图分类号: TN433

文献标识码: A

Design of a BiCMOS Integrated Temperature Sensor Proportional to Absolute Temperature

WANG Jinjun^{1,2}, WANG Xia³

(1. School of Electrical and Information Engineering, Shaanxi University of Science & Technology, Xi'an 710021, China;

2. School of Electronic and Information Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

3. School of Electrical and Control Engineering, Xi'an University of Science & Technology, Xi'an 710054, China)

Abstract: Proportional to absolute temperature (PTAT) BiCMOS integrated temperature sensor was designed by applying the index characteristics of a MOSFET transistor saturated drain current, which worked on weak inversion region. The main circuit was composed by three parts, which were PTAT current generating circuit, start-up circuit and output circuit. The circuit had the advantages of simple structure and small volume. The tested results indicated that the accuracy of the integrated temperature sensor was within 0.5 °C, the linearity was within 0.65%, the sensitivity was 2.5 $\mu\text{A}/^\circ\text{C}$ and the area of the chip was 150 $\mu\text{m} \times 75 \mu\text{m}$. The integrated temperature sensor had higher linearity and sensitivity which could be widely applied to various kinds of portable electronic products.

Key words: integrated temperature sensor; proportional to absolute temperature; BiCMOS

0 引言

温度传感器是应用最广泛的传感器之一,传统的温度传感器(如热电偶、铂电阻、双金属开关等)与现代集成电路工艺的不兼容,制约了它们在微型化高端电子产品中的应用。与之相比,集成温度传感器因其具有灵敏度高,线性度好,体积小,功耗低,时间常数小,自热温升小,抗干扰能力强,可在片检测温度等优点^[1],在各类便携式电子产品中得到了广泛应用。传统的 CMOS 集成温度传感器受工艺波动的影响大^[1];双极型集成温度传感器的功耗大,芯片面积大,与标准数字工艺不兼容^[1]。而 BiCMOS 集成温度传感器采用双极晶体管作为温度传感器的感温元件,具有受工艺波动的影响小、与标准数字

工艺兼容,功耗低等优点。本文主要利用 BiCMOS 工艺设计一款高性能的集成温度传感器。

1 弱反型区 MOS 管饱和漏电流的指数特性

根据 MOS 管弱反型区电特性的理论分析,当 N 沟 MOSFET 工作在弱反型区时,若源极电压不为 0,则其漏电流可表示为^[2]

$$I_D \approx I_{D0} \frac{W}{L} \exp\left(\frac{V_{GB}}{mV_T}\right) \cdot \left[\exp\left(\frac{-V_{SB}}{V_T}\right) \cdot \exp\left(\frac{-V_{DB}}{V_T}\right) \right] \quad (1)$$

式中: V_{GB} , V_{SB} , V_{DB} 分别为栅极、源极和漏极对衬底的电位; m 为和衬偏调制系数有关的常数; W 为沟道宽度; L 为沟道长度; I_{D0} 是 $W/L=1$ 及各电极对

收稿日期: 2012-08-10

基金项目: 2010 陕西科技大学校级自选科研基金资助项目(ZX10-28)

作者简介: 王进军(1980-),男,陕西礼泉人,讲师,博士生,主要从事宽禁带半导体材料与器件、混合信号集成电路设计方面的研究。E-mail: wangjinjun6113@126.com.

地(衬底)电位为0时的漏电流; $V_T = kT/q$ 。当器件工作于饱和区时, $\exp\left(\frac{-V_{SB}}{V_T}\right)$ 项可忽略:

$$I_D \approx I_{DO} \frac{W}{L} \exp\left(\frac{V_{GB}}{mV_T}\right) \cdot \exp\left(\frac{-V_{SB}}{V_T}\right) \quad (2)$$

2 BiCMOS 集成温度传感器电路设计

本文所设计的 BiCMOS 集成温度传感器主要由与绝对温度成正比(PTAT)电流源产生电路、启动电路和输出电路 3 部分组成, 电路原理如图 1 所示。 I_{PTAT} 为与热力学温度成正比的输出电流。

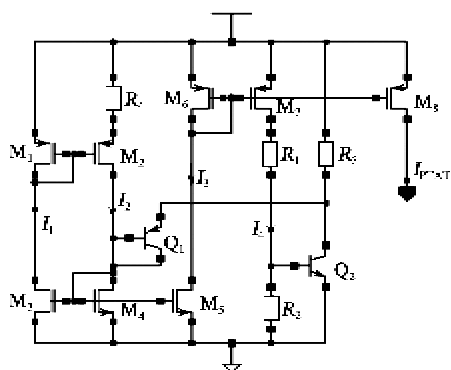


图1 BiCMOS集成温度传感器电路图

2.1 PTAT 电流源产生电路

MOS 管 M_1 、 M_2 、 M_3 、 M_4 和电阻 R_1 组成 PTAT 电流源产生电路^[3], 电流源电路正常工作后, M_1 、 M_2 、 M_3 、 M_4 均工作在弱反型区, 其饱和漏电流和端口电压之间满足式(2), 图1中, M_1 、 M_2 的栅电压相等, $V_{SB1} = 0$, $V_{SB2} = I_2 R_4 = V_{R4}$, 由式(2)可得

$$\frac{I_{D1}}{I_{D2}} = \frac{W_1/L_1}{W_2/L_2} \exp\left(\frac{-V_{R4}}{V_T}\right) \quad (3)$$

同样对于 M_3 、 M_4 , $V_{SB1} = V_{SB2}$, 可得

$$\frac{I_{D3}}{I_{D4}} = \frac{W_3/L_3}{W_4/L_4} \quad (4)$$

流过 M_1 、 M_2 与 M_3 、 M_4 的电流分别相等, 所以

$$\frac{I_{D1}}{I_{D2}} = \frac{I_{D3}}{I_{D4}} = \frac{W_1/L_1}{W_2/L_2} \exp\left(\frac{V_{R4}}{V_T}\right) = \frac{W_3/L_3}{W_4/L_4} \quad (5)$$

由式(5)可得

$$V_{R4} = V_T \left(\frac{W_3/L_3}{W_1/L_1} \frac{W_2/L_2}{W_4/L_4} \right) = \frac{KT}{q} \ln\left(\frac{W_2/L_2}{W_1/L_1} \frac{W_3/L_3}{W_4/L_4}\right) \quad (6)$$

所以

$$I_2 = \frac{V_{R4}}{R_4} = \frac{KT}{R_4 q} \ln\left(\frac{W_2/L_2}{W_1/L_1} \frac{W_3/L_3}{W_4/L_4}\right) \quad (7)$$

由式(7)可看出 I_2 与绝对温度 T 成正比。

2.2 启动电路

电阻 R_1 、 R_2 、 R_3 和双极型晶体管 Q_1 、 Q_2 及

MOS 管 M_7 构成 PTAT 恒流源电路的启动电路^[4]。系统上电, 电阻 R_3 将 Q_1 的发射极和 Q_2 的集电极电压设置为电源电压, 此时, Q_1 、 Q_2 基极初始电压为 0, 随着电源电压的升高, 晶体管 Q_1 的发射结电压升高, Q_1 管导通, Q_1 的基极和集电极向 PTAT 恒流源电路注入启动电流, 恒流源电路开始启动, 产生 PTAT 电流 I_2 。 M_5 镜像 M_4 上的电流, 得到:

$$I_2 = \frac{W_5/L_5}{W_4/L_4} I_2 \quad (8)$$

M_6 为 M_5 的有源负载, M_7 与 M_6 镜像连接, 流过 M_7 的电流 I_3 为

$$I_3 = \frac{W_7/L_7}{W_6/L_6} I_2 = \frac{W_7/L_7}{W_6/L_6} \frac{W_5/L_5}{W_4/L_4} I_2 \quad (9)$$

I_3 经电阻 R_1 、 R_2 分压, 在 R_2 产生 $I_4 R_2$ 的电压, 使 Q_2 管的基极电压升高并导通, Q_2 管的发射极电位被拉低, Q_2 管截止, 启动结束。

2.3 输出电路

M_8 镜像流过 M_7 的电流, 得到与绝对温度成正比的 PTAT 输出电流:

$$I_{PTAT} = \frac{W_8/L_8}{W_6/L_6} I_3 \quad (10)$$

把式(7)、(8)代入式(10)可得

$$I_{PTAT} = \frac{KT W_8/L_8}{R_4 q W_6/L_6} \frac{W_5/L_5}{W_4/L_4} \ln\left(\frac{W_2/L_2}{W_1/L_1} \frac{W_3/L_3}{W_4/L_4}\right) \quad (11)$$

通过调整 M_1 、 M_2 、 M_3 、 M_4 、 M_6 、 M_8 的宽长比及电阻 R_4 的阻值, 可调整 I_{PTAT} 的温度灵敏度, 即温度系数。

3 BiCMOS 集成温度传感器版图设计

由于图1电路中既用到了双极型 PNP 型晶体管 Q_1 , 又用到了双极型 NPN 型晶体管 Q_2 , 在单阱 BiCMOS 工艺中要同时实现这两种类型的管子是不可能的, 因此这里采用双阱 BiCMOS 工艺来同时实现这两种双极晶体管, 其剖面结构如图2所示^[5]。

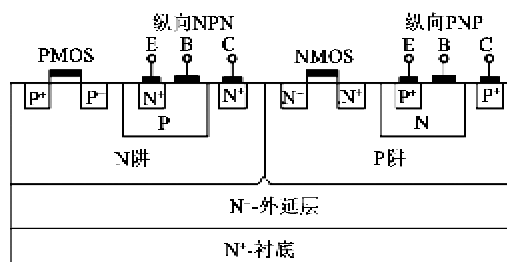


图2 双阱硅栅 BiCMOS 工艺剖面图

采用 UMC 0.6 μm BiCMOS 工艺设计的与绝对温度成正比 BiCMOS 集成温度传感器的版图如图3所示, 芯片面积 $150 \mu\text{m} \times 75 \mu\text{m}$ 。

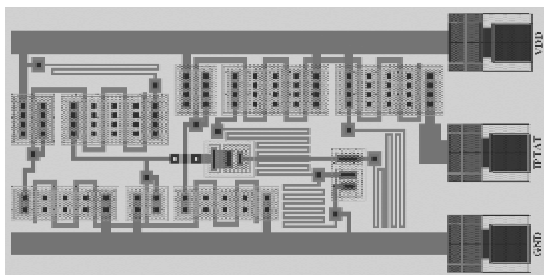


图3 PTAT BiCMOS集成温度传感器的版图

在版图设计过程中将需要匹配的器件 M_1 与 M_2 、 M_3 与 M_4 、 M_5 与 M_7 、 M_6 与 M_8 尽量靠近放置,将需要匹配的器件按指状交叉方式共质心排列。对 MOS 管而言,采用折叠式结构可使 2 个管子共用一个源极或漏极,从而减小源极或漏极的寄生电容,并且这种结构还可以降低栅端的寄生电阻。由于扩散电阻、MOS 电阻具有较大的温度系数,为减小式(10)中 R_4 的温漂对 I_{PTAT} 线性度的影响,图 1 电路中的电阻 R_1 、 R_2 、 R_3 、 R_4 均采用多晶硅电阻实现。为减小如金属、多晶引入为寄生电阻和寄生电容,因此,那些对保证电路性能起关键作用的连线采用蛇形排列,尽可能缩短线。

4 仿真与测试结果

4.1 仿真结果

采用 UMC 0.6 μm BiCMOS 工艺,对 I_{PTAT} 与温度间关系的仿真结果如图 4 所示。由图可看出,温度从 $-40\sim 125\text{ }^\circ\text{C}$ 间变化时, I_{PTAT} 基本上与温度成线性关系,而受电压、模型影响较小。

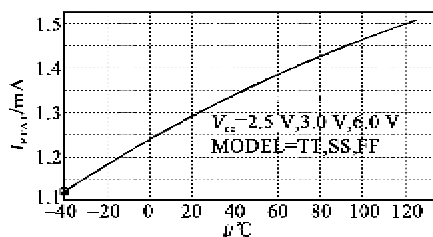


图4 温度传感器输出 PTAT 电流随温度变化仿真结果

4.2 测试结果

3 个温度传感器芯片样品输出的 PTAT 电流基于 PCB 板进行测试。测试过程中用到的实验设备主要有直流电源、数字万用表及温控恒温箱。

测试时,先给芯片上电(5 V),然后将 PCB 板放入温控恒温箱中加热,温度设为 T_1 ,测出此时芯片的输出电流 I_{out1} ,再把温度设为 T_2 ,测出此时芯片的输出电流 I_{out2} ,以此类推。由于恒温箱性能有限,只能从 $10\text{ }^\circ\text{C}$ 开始加热,所以测试时从 $10\text{ }^\circ\text{C}$ 开始,每个 $10\text{ }^\circ\text{C}$ 用数字万用表测量一次芯片的输出电流值,3 块样品的温度特性测试结果如图 5 所示。

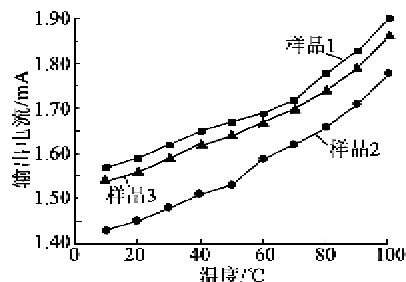


图5 PTAT 电流随温度变化测试结果

由以上 3 块样品的测试结果可看出,利用工作在弱反型区 MOS 管饱和漏电流的指数特性设计的 BiCMOS 集成温度传感器,在温度 $10\sim 100\text{ }^\circ\text{C}$ 精度小于 $0.5\text{ }^\circ\text{C}$ 、线性度小于 0.65% 、灵敏度 $2.5\text{ }\mu\text{A}/^\circ\text{C}$ 。由于样品抽取的随机性、工艺波动性和测试条件的分散性,3 块样品的测试结果稍有差别,但基本都能反映出输出电流随温度的线性变化规律。

温度较高时,输出电流随温度变化剧烈,这主要是由于芯片工作过程中自热效应引起的,温度越高自热效应越明显^[5]。另外,测试结果与仿真结果存在较大差别,其主要原因是仿真过程中使用的是理想的器件模型,没有考虑自热效应,所以仿真结果比实际测试的结果小。

5 结束语

本文利用工作在弱反型区 MOS 管饱和漏电流的指数特性,采用 UMC 0.6 μm BiCMOS 工艺设计的与绝对温度成正比集成温度传感器电路结构简单,体积小,输出电流与温度成线性关系,具有线性度及灵敏度高的优点,输出为模拟电流信号,便于采集,为后端处理和应用提供方便,可广泛应用于各类便携式电子产品中。

参考文献:

- [1] ZHANG Xun, JIN Dongming, LIU Litan. Review of semiconductor temperature sensors development[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2006, 25(3):1-5.
- [2] LIN Saihua, YANG Huazhong. Design of a novel all CMOS built in temperature sensor[J]. Chinese Journal of Semiconductors, 2006, 27(3):551.
- [3] ANTON B, JOHAN H H. A low cost high-accuracy CMOS smart temperature sensor[J]. IEEE Solid-State Circuits, 2004, 30(2):1-4.
- [4] JIANG H, LU J, XU J H. Design of a CMOS integrated temperature sensor based on dynamic element matching[J]. Chinese Journal of Semiconductors, 2007, 28(11):1824-1829.
- [5] 朱正涌. 半导体集成电路[M]. 北京:清华大学出版社, 2001.