

一种低成本高精度 CMOS 基准电压源设计

肖海鹏, 马 卓, 张民选, 张正旭

(国防科技大学 计算机学院, 湖南 长沙 410073)

摘 要: 利用电子迁移率和 MOS 管阈值电压对温度的变化呈反向趋势的原理, 基于 $0.13\mu\text{m}$ 标准 CMOS 工艺, 设计实现了一款非带隙的基准源电路. Hspice 仿真显示该基准能提供 0.715V 基准输出, 并可以根据需要在 $0.4\text{V}\sim 1\text{V}$ 范围内进行调节. 在 $-25^\circ\text{C}\sim 125^\circ\text{C}$ 范围内, 温度系数为 21.6ppm , 在 25°C 时输出基准线性度为 0.237% .

关键词: CMOS 基准电压源; 阈值电压; 电子迁移率

中图分类号: TN4

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2010)05-0121-04

Design of a High Accuracy CMOS Voltage Reference with Low Cost

XIAO Hai-peng, MA Zhuo, ZHANG Min-xuan, ZHANG Zheng-xu

(School of Computer Science, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: In this paper a non-bandgap voltage reference was designed in a standard $0.13\mu\text{m}$ CMOS technology, based on element that electron mobility and threshold voltage have opposite temperature coefficients. The simulation results using by Hspice show that the output of proposed voltage reference is 0.715V and it can be adjusted from 0.4V to 1V . Within the temperature range from -25°C to 125°C , a temperature coefficient of $21.6\text{ppm}/^\circ\text{C}$ is achieved, and the line regulation at 25°C is $0.237\%/V$.

Key words: CMOS voltage reference; threshold voltage; electron mobility

1 引言

基准电压源(Voltage Reference)是当今集成电路中重要的组成部分,广泛应用于数字、模拟、以及数模混合电路中.特别是在诸如随机动态存储器、A/D、D/A 转换器、数模混合 IC 中更是不可或缺.因此高电源抑制比、低温漂、与 CMOS 工艺兼容的高性能基准电压源成为集成电路设计中的焦点.

目前集成电路中基准电压源的构成种类繁多,带隙基准^[1-2]由于其精度高而为业内所广泛采用.利用 PN 结的正向电压具有负温度系数,而工作在不同电流密度下两个双极晶体管的基极-发射极电压差具有正温度系数,两者相互补偿,实现零温度系数的基准电压.此种结构需要采用运算放大器,电路结构复杂,占用面积较大.目前主流的 CMOS 工艺虽然都能提供衬底 PNP 管,但是 PNP 管对衬底的

电流注入会同时引起衬偏等问题,工艺步骤复杂,这无疑大大增加了系统的成本,降低了系统可靠性.

文中设计的新型基准电压源同样是利用负温度系数因子与正温度系数因子相互补偿的原理来实现,但这两者不再是 PN 结与 BJT,取而代之的是具有负温度系数的 MOS 阈值电压和具有正温度系数的沟道电子迁移率.这种方式与普通的 CMOS 工艺完全兼容,无需更多的掩膜板,同时结构简单,占用面积小,可以大幅降低芯片的制造成本.文中采用 $0.13\mu\text{m}$ 工艺对该结构进行实现,并通过了电路图和版图的模拟验证,结果显示达到了设计目标.

2 CMOS 基准电压源的实现

当前业内对于非带隙基准源的研究十分活跃,实现方式种类繁多,主要包括有利用低于 ZTC(Zero Temperature Coefficient)工作点下 MOS 管的源漏电

收稿日期: 2009-02-26; 修回日期: 2009-05-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(60873016); 国家“八六三”计划项目(2008AA01Z149)

压^[3];利用亚阈态下的源漏电压^[4]等.文中设计的结构^[5]与它们相比,具有输出基准电压高,输出电压可调范围大的优势,故而应用范围更广.

2.1 零温度系数基准电压的实现

文中设计的电路结构如图 1,分为三个部分:启动电路、基准电流产生电路、基准电压产生电路.

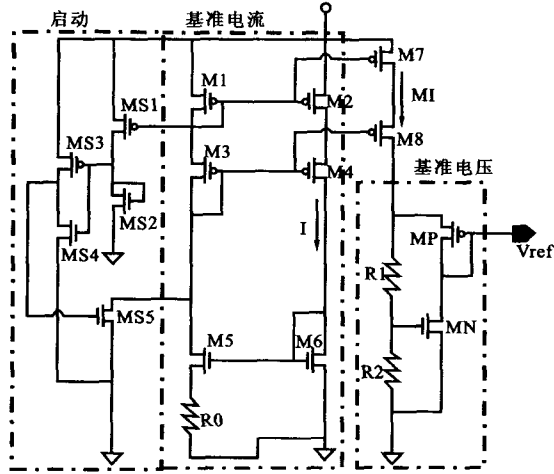


图 1 基准电压源电路图

基准电压产生电路产生零温度系数的基准电压. M7、M8 管复制由基准电流产生电路产生的基准电流为基准电压产生电路供电. 假设 MP、MN 管均工作在饱和区,则可以推导出基准电压的表达式为:

$$V_{\text{ref}} = \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right) V_{\text{GSN}} - |V_{\text{GSP}}| \quad (1)$$

由于是工作在饱和区,可以利用饱和区电流公式计算出 V_{GSN} 、与 V_{GSP} 并代入式(1)中,忽略沟长调制,可得:

$$V_{\text{ref}} = \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right) \left[V_{\text{thn}} + \sqrt{\frac{2MI}{u_n c \left(\frac{w}{l}\right)_n}} \right] - \left[V_{\text{thp}} + \sqrt{\frac{2MI}{u_p c \left(\frac{w}{l}\right)_p}} \right] \quad (2)$$

观察表达式(2)可以发现其中阈值电压 V_{GSN} 、 V_{GSP} 以及沟道电子迁移率 u_n 、 u_p 具有温度特性. 如果能通过调整电阻和管子尺寸的方法使得 V_{ref} 的表达式关于温度的一阶导数为零,就能得到零温度系数的基准电压. 根据文献[6]的说明,阈值电压、沟道电子迁移率随温度变化的关系可以采用一种比较精确的模型对其进行描述^[6]:

$$\begin{cases} V_{\text{thn}}(T) = V_{\text{thn}}(T_0) - \beta_{\text{thn}}(T - T_0) \\ |V_{\text{thp}}(T)| = |V_{\text{thp}}(T_0)| - \beta_{\text{thp}}(T - T_0) \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} u_n = u_n(T_0)(T/T_0)^{-\beta_{un}} \\ u_p = u_p(T_0)(T/T_0)^{-\beta_{up}} \end{cases} \quad (4)$$

式中, T_0 是参考温度, T 是工作温度. β_{thn} 、 β_{thp} 是 NMOS 与 PMOS 管阈值电压的温度系数, β_{un} 、 β_{up} 是管子沟道电子迁移率的温度系数,两者均与制造工艺关系密切,不同厂商、不同制造工艺下的温度系数均有不同. 文中采用的是 $0.13\mu\text{m}$ 工艺对电路结构进行实现.

将 u_n 、 u_p 、 V_{thn} 、 V_{thp} 的表达式(3)、(4) 分别代入 V_{ref} 的表达式(2) 中,并将其对温度求导,可得如下表达式:

$$\begin{aligned} \frac{\partial V_{\text{ref}}}{\partial T} = & \left[- \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right) \beta_{\text{thn}} + \beta_{\text{thp}} \right] + \\ & \frac{\beta_{uf}}{T_0} \sqrt{\frac{2MI_B(T_0)}{u_p(T_0) c_{ax} \left(\frac{w}{l}\right)_p}} \times \left[\left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right) \left(\frac{1}{2} + \frac{\beta_{un}}{2\beta_{up}}\right) \right. \\ & \cdot \left. \sqrt{\frac{u_p(T_0) \left(\frac{w}{l}\right)_p}{u_n(T_0) \left(\frac{w}{l}\right)_n}} \times \left(\frac{T}{T_0}\right)^{\frac{\beta_{up} + \beta_{un} - 2}{2}} - \left(\frac{T}{T_0}\right)^{\beta_{up} - 1} \right] \end{aligned} \quad (5)$$

式(5) 包括一个线性部分和一个非线性部分. 令这两个部分分别为零,就能推出电路中电阻以及管子尺寸比值关系.

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{\beta_{\text{thp}}}{\beta_{\text{thn}}} - 1 \quad (6)$$

$$\left(\frac{w}{l}\right)_p = \frac{u_n(T_0) \left(\frac{T_r}{T_0}\right)^{\beta_{up} - \beta_{un}}}{u_p(T_0) \left(\frac{T_r}{T_0}\right)^2} \quad (7)$$

如果电阻 R_1 、 R_2 , MOS 管 MP、MN 满足表达式(6)、(7)的比例关系,则输出电压关于温度的一阶导数为零,于是该电压源具有零温度漂移特性.

需要注意的是公式推导是建立在两个 MOS 管均处于饱和区. 因此需要选取适当的电流值、电阻值以及管子尺寸,使得 MN、MP 处于饱和区. 同时为了减小沟道长度调制效应的影响,MP、MN 管要选用长沟道器件.

在整个公式的推导过程中的电阻是理想的,而实际上电阻却是具有温度系数的. 根据式(5) 可以看到影响输出基准的仅仅是电阻的比值,而不是其电阻值. 当 R_1 、 R_2 由于温度关系又或者是工艺制造关系而发生小幅变化时,因为两者只能同时同向变化,故对电阻的比值影响较小. 并且电阻发生微小偏差的时候电阻的比值相当于在式(5) 中分别引入了一个负偏差和一个正偏差. 两者相互作用会进一步削弱其对输出基准的影响. 需要注意的是在设计的时候

候要留足余量,让 MN,MP 管工作在深饱和区,防止因为电阻变化的影响导致 MOS 管进入线性区。

2.2 辅助电路的设计

基准电压产生电路的前提是需要有一个稳定的电流产生电路,整个基准源电路如图 1。电阻 R_0 、MOS 管 M1~M6 构成了一个与电源无关的基准电流产生电路。M3~M6 是一种“自举”结构电流镜,其在忽略沟道长度调制效应时,可以实现输出电流与电源电压无关。根据电路图可以知道 $V_{GS6} = V_{GS5} + I_{D6}R_0$ 。用饱和区电流公式解出 V_{GS6} 、 V_{GS5} 并带入可以得到如下关系:

$$I = \frac{2}{u_n c_{ox} k(w/l)_n} \frac{1}{R_0^2} (\frac{1}{\sqrt{K}} - 1)^2 \tag{8}$$

输出电流与电源电压无关,但仍与温度及制造工艺有关。在推导过程中忽略了沟道长度调制效应,为了减小该效应对电路性能的影响,需要采用长沟道器件。同时设计中增加了 MOS 管 M1、M2 使得其与 M3、M4 一起构成了一个共源共栅电流镜,在有效抑制沟道长度调制的影响下也可以起到一定的电源抑制作用。虽然基准电流产生电路与温度有关,但是根据式(2)可以知道 $V_{ref} \propto \sqrt{MI}$,电流的变化对输出的影响是十分有限的。

基准电流产生电路除了式(8)所推导出来的状态外还存在一个“死锁态”。式(8)在电流为零时仍然成立,表现在电路就是当电源上电的时候所有的 MOS 管均传输零电流,而环路两边的分支是允许零电流的,则电路可以无限期保持关断形成“死锁”。为此需要增加启动电路。当出现“死锁”态时,图 1 中 M1~M4 的栅电压为高,M5、M6 的栅电压为低。此时 MS1 管关断,MS5 打开。增加了一条额外的对地通路,将 M3、M4 的栅电压拉低,使得电路摆脱“死锁态”。电路启动后 MS5 管关断,电路开始正常工作。

3 模拟验证与分析

文中应用标准 0.13μm 工艺对设计的结构进行实现(如图 2),版图面积 52×36μm。

采用 Hspice 进行版图后仿真。该结构在 T 为 25℃ Corner 下的输出基准电压为 0.715V。温度由 -25~125℃ 变化时,输出基准变化 2.32mV,温度系数为:

$$\begin{aligned} T_{CF} &= \frac{1}{V_{ref}} \cdot \frac{dV_{ref}}{dT} \approx \frac{1}{0.715V} \cdot \frac{2.32 \times 10^{-3}V}{150^\circ C} \\ &= 21.6 \times 10^{-6}V/^\circ C = 21.6ppm/^\circ C \end{aligned} \tag{9}$$

电源电压由 2.2V 变化到 3.5V 时,输出基准变化 2.2mV(波形如图 3),线性度为:

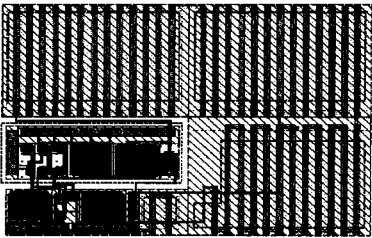


图 2 基准源的版图实现

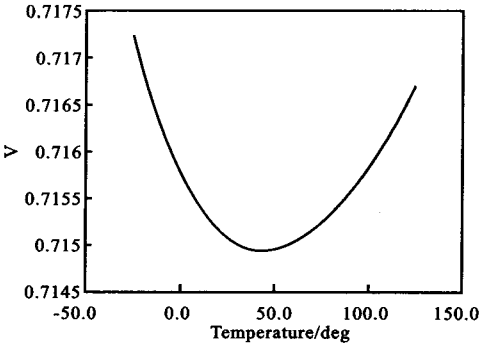


图 3 温度特性曲线图

$$\begin{aligned} \text{Line _ Regulation} &= \frac{\Delta V_{ref}/V_{ref}}{\Delta V_{DD}} \times 100\% = \\ &= \frac{2.2 \times 10^{-3}V/0.715V}{1.3V} = 0.237\%/V \end{aligned} \tag{10}$$

电源抑制比在低频时为 -50dB,波形如图 4、图 5 所示。

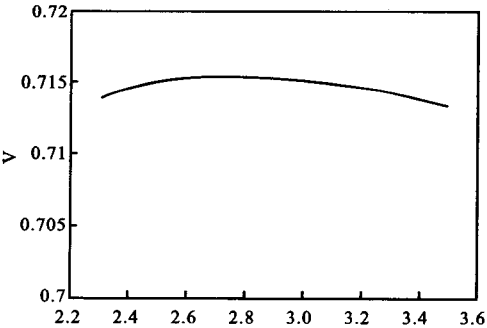


图 4 线性度曲线图

从模拟数据可以看出该基准源的温度特性已经和带隙基准的温度特性不相上下,但是在线性度和电源抑制比方面还不是非常理想。这主要是因为没有采用运放结构并引入反馈机制。如果能采用运放结构来产生一个随电源电压变化较小的局部电压向电流、电压基准产生电路供电,那么该结构的性能将能得到更大的提升。

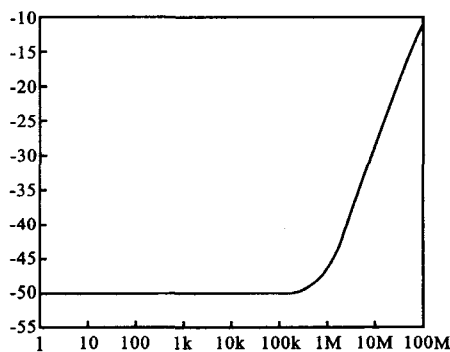


图5 电源抑制比曲线图

4 结束语

文中利用阈值电压的负温度系数与沟道电子迁移率的正温度系数相互补偿的方法实现了一款新型的 CMOS 电压基准源. 其在典型情况下的基准输出为 0.715V. $-25 \sim 125^{\circ}\text{C}$ 温度变化范围内的温度系数为 21.6ppm/ $^{\circ}\text{C}$, 输出线性度 0.237%/V, 电源抑制比在低频时为 -50dB. 而通过调节工作电流和基准电压产生电路的电阻值, 可以实现 0.4~1.0V 的基准输出. 其与传统的带隙基准相比具有结构简单、调整方便、版图面积小的优势. 更重要的是无需增加额外工艺步骤来实现对双极型晶体管的兼容, 大幅降低了系统成本, 具有广阔的应用前景.

参考文献:

- [1] 谢毅, 朱云涛, 邵丙铤. 一种低电压的 CMOS 带隙基准源[J]. 微电子学与计算机, 2005, 22(5): 110-113.
- [2] 张科, 冯全源. 一种带软启动电路的带隙基准电压源的实现[J]. 微电子学与计算机, 2006, 23(12): 179-181.
- [3] Najafizadeh L, Filanovsky I M. Toward a Sub - 1 V CMOS coltage reference[J]. IEEE Transactions on Circuit s and system, 2004: 127-130.
- [4] Huang Po-Hsuan, Lin Hongchin, Lin Yen-Tai. A simple subthreshold CMOS voltage reference circuit with channel-length modulation compensation[J]. IEEE Transactions On Circuit s And System, 2006, 53(9): 882-885.
- [5] Ka Nang Leung, Philip K T Mok. A CMOS voltage reference based on weighted-VGS for CMOS low-dropout linear regulators[J]. IEEE J Solid-State Circuits, 2003, 38(1): 151-154.
- [6] Filanovsky I M, Allam A. Mutual compensation of mobility and threshold voltage temperature effects with application in CMOS circuits[J]. IEEE J. Solid-State Circuits, 2001(48): 876-884.

作者简介:

肖海鹏 男, (1982-), 硕士研究生. 研究方向为高性能集成电路设计与实现.

马卓 男, (1980-), 博士研究生, 讲师. 研究方向为高性能集成电路设计与实现.

张民选 男, (1955-), 博士生导师, 教授. 研究方向为微体系结构设计.

(上接第 120 页)

- [3] 柳群英. 基于形状特征的图像检索技术[J]. 情报检索, 2004(4): 87-89.
- [4] 黄勇, 王崇骏, 王亮, 等. 基于形状不变矩的图像检索算法的研究[J]. 计算机应用研究, 2004(7): 256-258.
- [5] 张锋利. 基于内容的图像检索方法研究[J]. 吉林大学学报, 2006(5): 187-190.
- [6] 杨枝灵, 王开. Visual C++ 数字图像获取、处理及实践应用[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2003.

- [7] 黄剑玲, 邹辉. 基于高斯 Laplace 算子图像边缘检测的改进[J]. 微电子学与计算机, 2007, 24(9): 155-157.

作者简介:

王吉林 男, (1966-), 硕士, 副教授. 研究方向为电子技术与信息处理.

赵力 男, (1958-), 教授, 博士生导师. 研究方向为信号与信息处理.