

引用格式:陈贵宝,郭仲杰,李婷,等. 一种高精度 CMOS 温度传感器的设计[J]. 微电子学与计算机, 2019, 36(8): 34-38.
[CHEN G B, GUO Z J, LI T, et al. Design of a high accuracy CMOS temperature sensor[J]. Microelectronics & Computer, 2019, 36(8): 34-38.]

一种高精度 CMOS 温度传感器的设计

陈贵宝¹, 郭仲杰^{1,2}, 李 婷¹, 魏海龙¹

(1 西安微电子技术研究所, 陕西 西安 710054; 2 西安理工大学 自动化与信息工程学院, 陕西 西安 710048)

摘 要: 基于标准 CMOS 工艺, 提出了一种高精度低功耗的温度传感器. 通过采用高精度比例电流生成模块、纵向寄生的 NPN 型双极晶体管以及改进的输出端结构等措施, 抑制了电路噪声、提高了温度到电压的转换精度. 基于 55 nm CMOS 工艺, 采用 Spectre 工具对电路进行仿真, 结果表明: 该温度传感器在 $-55^{\circ}\text{C} \sim 85^{\circ}\text{C}$ 内灵敏度为 $3.84 \text{ mV}/^{\circ}\text{C}$, 仿真精度为 0.17°C , 电路功耗为 $130 \mu\text{A}$. 经过后端物理实现后, 版图面积为 $325 \mu\text{m} \times 64 \mu\text{m}$. 采用 STAR_RCXT 对该电路提参后仿, 得到后仿真精度为 $0.14^{\circ}\text{C}/-0.24^{\circ}\text{C}$.

关键词: 温度传感器; 高精度; 寄生 NPN 管; 开关电容电路

中图分类号: TN432

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2019)08-0034-05

Design of a high accuracy CMOS temperature sensor

CHEN Gui-bao¹, GUO Zhong-jie^{1,2}, LI Ting¹, WEI Hai-long¹

(1 Xi'an Microelectronics Technology Institute, Xi'an 710054, China; 2 College of Automation and Information Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: Based on standard CMOS process, a high accuracy and low power temperature sensor is proposed. By adopting high precision proportional current generation modules, vertical parasitic NPN bipolar transistors and improving output end structure, the noise of the circuit is suppressed and the temperature to voltage conversion accuracy is improved. Based on 55nm CMOS process, the circuit has been simulated with Spectre tool. The simulation results show that the sensitivity of the temperature sensor is $3.84 \text{ mV}/^{\circ}\text{C}$ and the inaccuracy is 0.17°C as the temperature differs from -55°C to 85°C . The whole circuit dissipates $130 \mu\text{A}$. After the back-end physical implementation, the layout of the temperature sensor occupies an area of $325 \mu\text{m} \times 64 \mu\text{m}$. Using STAR_RCXT to extract parasitic parameters from the layout and conduct post-simulation, the result indicates that the inaccuracy is $0.14^{\circ}\text{C}/-0.24^{\circ}\text{C}$.

Key words: temperature sensor ; high accuracy ; parasitic NPN transistor; SC circuit

1 引言

温度是影响集成电路工作性能的重要参数, 尤其是对于模拟集成电路. 为了监测芯片内温度以提高系统的可靠性, 目前多采用集成温度传感器, 主要实现方式有: MOS 管型的温度传感器^[1-2] 及 CMOS 工艺中寄生双极型晶体管型的温度传感器. CMOS 工艺中寄生双极型晶体管稳定, 器件参数可重复性

高, 具有和双极工艺中双极型晶体管一样优越的性能, 而且 CMOS 工艺成本低、集成度高、面积小, 以上特性决定了 CMOS 温度传感器具有价格低廉、设计简单、测量精确等优点.

目前, 大多数 CMOS 集成温度传感器都是利用寄生双极型晶体管基极—发射极电压的 CTAT 和 PTAT 特性而设计的带隙基准式温度传感器, 后端处理电路采用 $\Sigma\text{-}\Delta$ 型模数转换器, 包含大量

电容,并且为了保证精度,需要动态匹配、系统级斩波等校准技术,增加了设计的复杂程度,国内此类型的温度传感器很难达到 0.3°C 以下的精度^[3-4]. 本文提出了一种基于开关电容电路的温度传感器. 文中电路通过以下措施,提高了该温度传感器的性能:利用高精度比例电流生成模块将片内接入电流源转换成精确的大小比值为 8:1 的两路电流,避免了大量大面积双极型晶体管的使用;感温器件选用纵向寄生的 NPN 型双极晶体管以代替传统的衬底寄生 PNP 型双极晶体管,防止了有限电流增益对温度传感器精度的影响;通过改进输出端结构,在输出端两次采样获得输出电压差值,不仅消去了运算放大器失调电压的影响,而且大大减小了电路的噪声,从而提高了温度传感器的精度.

2 温度传感器的工作原理及系统结构

2.1 感温器件的设计

集成温度传感器的工作原理为:利用半导体器件中某个参数随温度变化的特性,获得一个随温度线性变化且可测的电压量或电流量. 双极晶体管的基极-发射极电压表达式可以写为:

$$V_{\text{BE}} = V_{\text{T}} \ln \left(\frac{I_{\text{C}}}{I_{\text{S}}} \right) \quad (1)$$

它表现出随温度负相关的特性. 但由于饱和电流

$$I_{\text{S}} = bT^{4+m} \exp \frac{-E_{\text{g}}}{kT} \quad (2)$$

即使 I_{C} 不变化, V_{BE} 随温度依然呈现较大的非线性,不能直接被用于高精度温度传感器的设计. 而如果有两个相同的双极型晶体管 ($I_{\text{S1}} = I_{\text{S2}}$), 它们基极与集电极短接,发射极接地(如图 1 所示). 当它们工作在大小为 $n:1$ 的不相等的电流密度下,忽略基极电流,那么有下式:

$$\begin{aligned} \Delta V_{\text{BE}} &= V_{\text{BE1}} - V_{\text{BE2}} = V_{\text{T}} \ln \frac{nI_0}{I_{\text{S1}}} - V_{\text{T}} \ln \frac{I_0}{I_{\text{S2}}} \\ &= V_{\text{T}} \ln n \end{aligned} \quad (3)$$

这样, V_{BE} 的差值就表现出正温度系数:

$$\frac{\partial V_{\text{BE}}}{\partial T} = \frac{k}{q} \ln n \quad (4)$$

这是一个与工艺无关、与温度严格线性相关的物理量,被用于一些高精度温度传感器的设计.

上面公式的导出存在着一个前提:忽略基极电流. 事实上,现今绝大多数 CMOS 集成温度传感器的感温器件选用的是衬底寄生 PNP 管^[3-7], 因它的

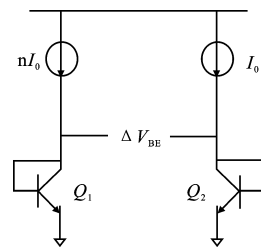


图 1 $n:1$ 倍电流偏置的双极型晶体管

集电极作为衬底必须接地,所以通常由发射极偏置,基极电流不可忽略, V_{BE} 必须修正为:

$$\begin{aligned} V_{\text{BE}} &= V_{\text{T}} \ln \left(\frac{I_{\text{C}}}{I_{\text{S}}} \right) = V_{\text{T}} \ln \left(\frac{I_{\text{E}} - I_{\text{B}}}{I_{\text{S}}} \right) \\ &= V_{\text{T}} \ln \left(\frac{I_{\text{bias}}}{I_{\text{S}}} \frac{\beta(T)}{\beta(T)+1} \right) \end{aligned} \quad (5)$$

$\beta = \frac{I_{\text{C}}}{I_{\text{B}}}$, 为电流增益,是一个随温度变化的值,

因此:

$$\begin{aligned} \Delta V_{\text{BE}} &= V_{\text{T}} \ln \left(n \frac{\beta'(T)}{\beta'(T)+1} \frac{\beta(T)+1}{\beta(T)} \right) \\ &= V_{\text{T}} \ln n + V_{\text{T}} \ln \left(\frac{\beta'(T)}{\beta'(T)+1} \frac{\beta(T)+1}{\beta(T)} \right) \end{aligned} \quad (6)$$

式中, β' 为 nI_0 偏置下 PNP 管的共射极增益,当 β 值有限时,上式第二项成为随温度变化的非线性项. 在深亚微米工艺中, β 值甚至达到单位增益,使得 PNP 型双极晶体管更难作为高精度温度传感器的感温器件使用^[8].

NPN 管相比于 PNP 管有着更高的 β 值,而且它直接由集电极精确偏置,没有非线性项,表现出比 PNP 管更好的线性特性^[8-9]. 所以在此次设计的温度传感器中,选择 CMOS 工艺中 NPN 型纵向寄生双极晶体管作为温度传感器的感温器件.

2.2 温度传感器系统结构

本文提出的温度传感器主要由高精度比例电流生成电路、核心感温器件、运算放大器、开关(S1~S4)电容(C1~C3)组组成(如图 2 所示). 比例电流生成电路实际上其主体为一个共源共栅电流镜,它的作用是将电流源 I_{REF} 转换成大小为 8:1 的两路电流;运算放大器的同相端接入 1.2 V 的共模电压,反向端与输出端分别跨接一个开关和一个电容的一端. 该电路的功能是伴随着开关 S1~S4 的闭合与断开而实现的:首先开关 S1、S3 闭合一段时间后断开,则 C1 一端采得 $8I_0$ 偏置的 NPN 管的基极-发射极电压 (V_{BE1}),同时放大器的输出端因单位增益负反馈获得与放大器同相端相同的 1.2 V 的电压

(在此过程中 S3 的断开时间稍提前于 S1, 以减小沟道电荷注入对 C1 一端采得的 V_{BE1} 产生的误差); 然后 S2、S4 闭合一段时间后断开, C1 一端在此过程中采得 I_0 偏置的 NPN 管的基极—发射极电压 (V_{BE2}) (同样 S4 的断开时间稍提前于 S2). 在 S1、S2 的切换下, C1 一端就先后采得 V_{BE1} 、 V_{BE2} , 它们的差值记为 ΔV_{BE} , 则在 C1 另一端积聚了 $c1 \cdot \Delta V_{BE}$ ($c1$ 为电容 C1 的容值) 的电荷量, 这些电荷在 C2 上产生的电压值为: $\frac{c1}{c2} \Delta V_{BE}$ ($c2$ 为电容 C2 的容值). 这个电压值是叠加在 1.2 V 共模电压之上的, 因此, 经过 S4, 在 C3 一端获得输出电压值:

$$V_{OUT} = 1.2\text{ V} + \frac{c1}{c2} \Delta V_{BE} \tag{7}$$

将输出电压值送与后级 ADC 进行处理, 即可得到一定位数的数字输出量.

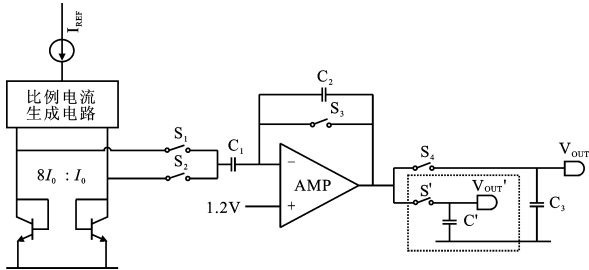


图 2 温度传感器系统结构

3 温度传感器电路设计

3.1 高精度比例电流生成电路的设计

该模块电路如图 3 所示, 它利用共源共栅电流镜抑制沟道长度效应及提高输出阻抗的高精度特性, 获得用来偏置 NPN 管的大小极近似于 8:1 的电流(可认为等于 8:1). 电路由 M1~M13 13 个晶体管组成, 其中 M1~M6 为相同类型、尺寸的晶体管, M8、M9、M10、M11、M12、M13 分别为相同类型、尺寸的晶体管. 假设 M8~M13 的尺寸分别为:

$$\left(\frac{W}{L}\right)_{8,9} = k_1, \left(\frac{W}{L}\right)_{10,11} = k_2, \left(\frac{W}{L}\right)_{12,13} = k_3, \text{ 则:}$$
$$\frac{I_{OUT1}}{I_{OUT2}} = \frac{k_2/k_3}{k_1/k_1} = \frac{k_2}{k_3} \tag{8}$$

在保持沟道长度一致时, 设置 M10~M13 的宽度, 可以使 $\frac{k_2}{k_3}$ 的值等于 8:1. 在该电路中, M9、M11、M13 的栅压由二极管连接的 M7 提供, M8 的栅与 M5、M9 的漏端相连, 形成一个高摆幅的结构, 同时为自身及 M10、M12 提供栅压.

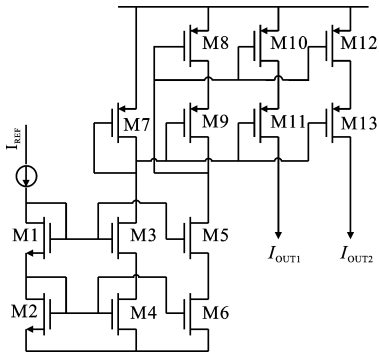


图 3 高精度比例电流生成电路

3.2 运算放大器的设计

运算放大器为一个两层叠的套筒式共源共栅运放, 它的结构简单, 是一级结构(如图 4 所示), 在获得与两级结构相同增益的同时, 不需要任何频率补偿就可以有超过 60° 的相位裕度. 套筒式共源共栅运放通常有低摆幅的特点, 因而在 PMOS 管电流镜负载中采用了和高精度比例电流生成电路中一样的高摆幅结构, 使得输出幅度多一个 PMOS 管的阈值电压, 而且在最高测量温度为 85℃ 的情况下, 输出电压不会太高, 对于摆幅的要求已足够.

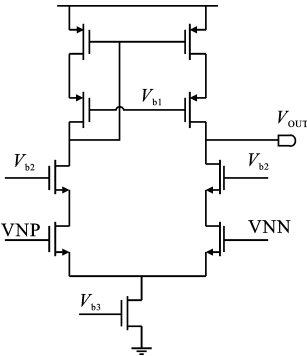


图 4 运算放大器电路

3.3 输出端结构的改进设计

事实上, 公式(7) 是不精确的. 假设运放输入参考失调电压 V_{OS} , 同时在输入端考虑到前级电路引入的等效输入噪声 $V_{n,in}$. 由于运放失调电压和电路噪声都随温度变化, $\frac{c1}{c2} \Delta V_{BE}$ 叠加的基础不仅不是 1.2V, 而且随温度变化, 导致温度传感器的精度下降.

为了减小 V_{OS} 、 $V_{n,in}$ 对温度传感器性能的影响, 在本设计中加入了如图 2 虚线部分所示的改进的输出结构. 新结构中, S' 的开关时机与 S3 同时, 于是, 在 S'、C' 作用的时段, 先在电容 C' 上获得输出电压

V_{OUT}' , 则:

$$V_{OUT}' = 1.2 V - (V_{OS} + \overline{V_{n,in}}) \quad (9)$$

而在 S4、C3 作用时段,

$$V_{OUT} = 1.2 V - (V_{OS} + \overline{V_{n,in}}) + \frac{c1}{c2} \Delta V_{BE} \quad (10)$$

定义:

$$V_{OUT}^* = V_{OUT} - V_{OUT}' \quad (11)$$

则:

$$V_{OUT}^* = \frac{c1}{c2} \Delta V_{BE} \quad (12)$$

就这样,两次采样结果的差值 V_{OUT}^* 抵消了沉积在 C' 、C3 上的运放失调电压以及前级电路噪声,提高了温度传感器的精度. 同样,两次采样值分别用后级 ADC 实现处理并相减后,可以得到更精确的具有一定位数的数字输出量.

4 设计实现与验证

4.1 前端设计验证

在不同温度下对电路进行了输出电压值的瞬态仿真,每隔 5°C 取一个仿真结果. 图 5 是传统输出结构下仿真电压值—温度的拟合曲线,在温度测量范围为 $-55^\circ\text{C} \sim 85^\circ\text{C}$ 的情况下,总电压变化值为 538.72 mV. 从图中可以看出,所有的取值点都散落在拟合曲线附近很小的范围内.

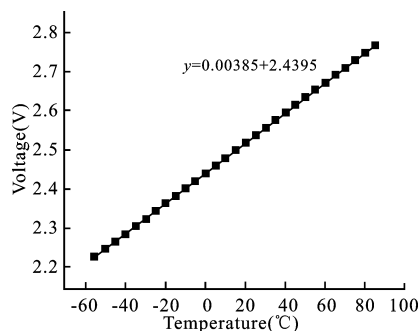


图 5 输出电压—温度拟合曲线

图 6 中系列 1 和系列 2 分别是传统输出结构和改进的输出结构下各取值点电压偏离拟合曲线大小的散点图. 如果把误差定义为:

$$\text{error} = \frac{V_{OUT}(\text{simulation}) - V_{OUT}(\text{curve})}{V_{OUT}(\text{max}) - V_{OUT}(\text{min})} (T_{\text{max}} - T_{\text{min}}) \quad (13)$$

系列 1 在 40°C 的时候,有最大 0.858 mV 的绝对值偏移量,代入误差定义式,得:

$$\text{error} = \frac{0.858}{538.72} \times 140^\circ\text{C} \quad (14)$$

计算结果: $\text{error} \approx 0.22^\circ\text{C}$, 即温度传感器的精

度为 0.22°C , 等效于输出电压—温度曲线 0.16% 的线性度; 系列 2 同样在 40°C 的时候,有最大 0.642 mV 的绝对值偏移量,代入误差定义式,计算得精度为 0.17°C , 等效于 0.12% 的线性度.

通过比较两种输出结构下的计算结果,我们发现,改进的结构相对于传统结构,线性度提高了 0.04%, 仿真精度提高了 0.05°C , 与前文理论分析一致.

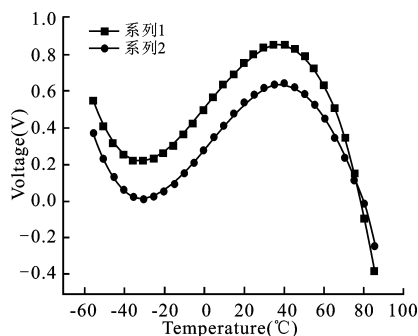


图 6 各取值温度输出电压对拟合曲线的偏移量

4.2 后端物理实现与验证

图 7 是本设计的温度传感器的版图, 面积为 $325 \mu\text{m} \times 64 \mu\text{m}$. 用 STAR_RCXT 对其进行后仿真参数提取, 在 3.3 V 电压下, 仿真结果如图 8 所示. 可以看出, 所有的取值点都散落在拟合曲线附近很小的范围内, 在 $-55^\circ\text{C} \sim 85^\circ\text{C}$ 范围内, 输出电压变化幅度为 537.63 mV.

图 9 是后仿真下输出电压对拟合曲线的偏移量, 图中有最大 0.547 mV / -0.925 mV 的偏移量, 代入误差定义式(13), 计算得温度传感器的精度为 $0.14^\circ\text{C} / -0.24^\circ\text{C}$.

表 1 对比了本文设计的温度传感器和其它文献温度传感器的性能. 文献[2]提出的是基于工作在亚阈值范围 MOS 管的温度传感器, 具有一定的精度. 但 MOS 管在亚阈值工作区时不稳定, 源漏电流随温度急剧变化, 因此测温范围通常不会太宽. 文献[8]是国外一款典型的带隙基准式温度传感器, 感温器件选用 NPN 型寄生双极晶体管, 采用了动态匹配、相关双采样、单点室温修调等复杂的校准技术. 其测温范围宽达 $-70^\circ\text{C} \sim 125^\circ\text{C}$, 达到了 $\pm 0.2^\circ\text{C}$ 的高精度.

5 结束语

本文提出了一种基于标准 CMOS 工艺中纵向寄生 NPN 型双极晶体管的高精度温度传感器的设计. 感温器件以 NPN 管代替传统的 PNP 管, 防止

了随温度变化的有限电流增益对温度传感器精度的影响;高精度比例电流生成电路的设计可以有效减少大量双极型晶体管的使用,减小了温度传感器的面积;输出端的改进结构,可以消去运放的失调电压和前级电路的噪声,提高了温度传感器的精度. 所提

出的电路设计基于 55nm CMOS 工艺完成了前端设计与后端实现,经过实际验证,在-55℃~85℃下,获得了 3.84 mV/℃的电压—温度响应. 电路的线性度非常好,改进的输出结构仿真精度仅 0.17℃. 后仿真精度为 0.14℃/-0.24℃.

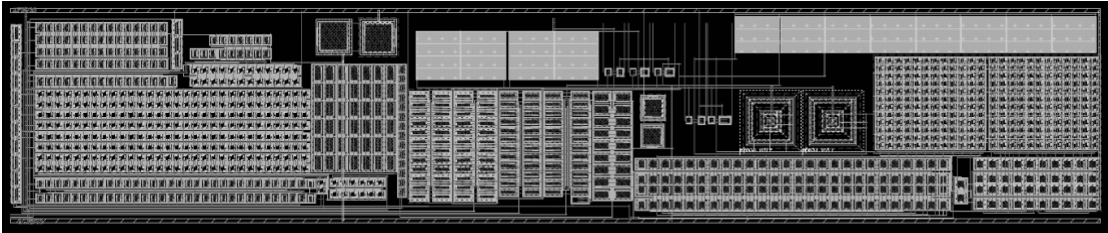


图 7 温度传感器版图

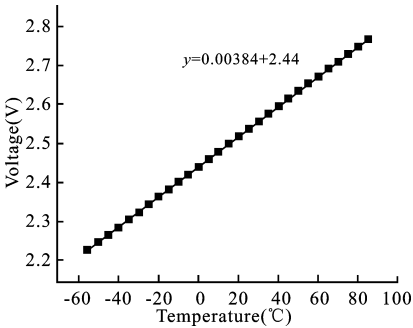


图 8 后仿真输出电压—温度拟合曲线

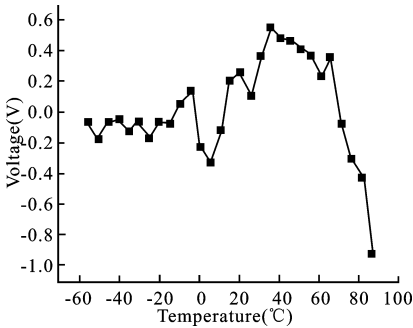


图 9 后仿真输出电压对拟合曲线的偏移量

表 1 温度传感器性能对比

文献	温度传感器类别	感温器件类型	测温范围/℃	灵敏度 mV/℃	精度/℃
[2]	亚阈值工作区	MOS	-20~60	3.9	0.5/-0.2
[4]	带隙基准式	寄生 PNP	-40~125	—	±0.42
[5]	开关电流源式	寄生 PNP	-55~125	2.34	1
[8]	带隙基准式	寄生 NPN	-70~125	—	±0.2
本文	开关电流源式	寄生 NPN	-55~85	3.84	+0.14/-0.24

参考文献:

[1] ZHAO C, WANG Y T, GENZER D, et al. A CMOS On-Chip Temperature Sensor with -0.21℃/0.17℃ Inaccuracy from -20℃ to 100℃[C]//International Symposium on Circuit and System. IEEE, 2013; 2621-2615.

[2] Gang CHEN G, XUE X Y, DONG Q, et al. A Novel Low Power Wide Supply Voltage Range CMOS Temperature Sensor with -0.2/0.5℃ Error from -20℃ to 60℃[C]//International Conference on Solid-State and Integrated Circuit Technology. IEEE, 2012; 1-3.

[3] 张存鹏,高精度温度传感器研究和设计[D]. 杭州:浙江大学,2014.

[4] 梁勇勤,高精度低功耗 CMOS 温度传感器的设计[D]. 西安:西安电子科技大学,2013.

[5] 秦瑞,沈延钊,王纪民.一种 CMOS 智能温度传感器前端电路的设计[J]. 微电子学,2007,37(2):286-290.

[6] 安永亮.基于 40nm CMOS 工艺低功耗温度传感器的设计[D]. 西安:西安电子科技大学,2012.

[7] SOURI K, SOURI K, MAKINAWA K. A 40 μW CMOS Temperature Sensor with an Inaccuracy of ±0.4℃(3σ) from -55℃ to 200℃[C]//Proceeding of the ESSCIRC. IEEE, 2013; 221-224.

[8] SEBASTIANO F, BREEMS L J, MAKINAWA K A A, et al. A 1.2-V 10-μW NPN-Based Temperature Sensor in 65-nm CMOS With an Inaccuracy of 0.2℃(3σ) From -70℃ to 125℃[J]. IEEE, Journal of Solid-State circuits, 2010,45(12):2591-2601.

(下转第 44 页)

[D]. 杭州:浙江大学, 2012.

[8] 王玮. 几种最新的图像缩放方法的比较性研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2013.

[9] 邹学瑜, 刘昌禄, 胡敬营. 基于双线性插值算法的缩放 IP 核设计[J]. 计算技术与自动化, 2017, 36(3): 113-117.

[10] 魏美荣, 蒋林. 一种自适应 Catmull-Rom 样条图像缩放算法的设计实现[J]. 微电子学与计算机, 2011, 28(12): 63-67+71.

[11] 吕荣国, 蒋林, 杨飞. 图像缩放的研究与 FPGA 设计[J]. 计算机技术与发展, 2011, 21(12): 205-208.

[12] 莫迪涵, 杜慧敏, 沈绪榜. 基于线性插值法图像缩放的设计与 FPGA 实现[J]. 西安邮电大学学报, 2013, 18(3): 52-55.

[13] 冉峰, 李天, 季渊, 等. 基于 FPGA 的图像缩放算法设计[J]. 光电子技术, 2017, 37(1): 21-26.

[14] 武文斌, 高俊雄, 王耘波. 基于叠加的图像缩放优化及 FPGA 实现[J]. 微电子学与计算机, 2017, 34(11): 128-130.

[15] 王中博, 周远远, 黄鲁. 基于多相位插值的视频缩放系统 FPGA 实现[J]. 微型机与应用, 2016, 35(24): 46-49.

[16] 丁家隆, 杜慧敏, 曹广界, 等. 基于最优移位双线性插值的图像缩放旋转硬件加速研究[J]. 微电子学与计算机, 2016, 33(7): 115-124.

[17] 吴以凯. 基于 FPGA 的视频缩放的设计与实现[D]. 镇江: 江苏大学, 2017.

作者简介:

任向隆 男, (1982-), 博士, 高级工程师. 研究方向为图形处理器系统结构、微处理器系统结构.
E-mail: r_x_l2004@163.com.

田 泽 男, (1965-), 博士, 研究员. 研究方向为 VLSI 设计、SoC 设计、航空专用集成电路设计.

张 骏 男, (1978-), 博士后, 高级工程师. 研究方向为图形处理器系统结构、微处理器系统结构.

(上接第 38 页)

[9] XU L, HUIJSING J H, MAKINAWA K A A. A 12uW NPN-based Temperature Sensor With a 18.4pJ • K⁻² FOM in 0.18um BCD CMOS[C]//International Workshop on Advances in Sensor and Interfaces. IEEE, 2017: 180-182.

作者简介:

陈贵宝 男, (1993-), 硕士研究生. 研究方向为 CMOS 集成

温度传感器设计.

郭仲杰(通讯作者) 男, (1982-), 教授, 研究员. 研究方向为数模混合集成电路设计. E-mail: zjguo@xaut.edu.cn.

李 婷 女, (1985-), 博士, 高级工程师, 研究方向为数模混合集成电路设计.

魏海龙 男, (1976-), 博士, 研究员, 硕士生导师. 研究方向为模拟集成电路设计.