

CPU 片上热敏元件及布局研究

施教芳¹, 苏品刚², 王 俭³

(1 苏州工艺美术职业技术学院 计算中心, 江苏 苏州 215104; 2 苏州职业大学 电子信息学院, 江苏 苏州 215104;
3 苏州科技大学 电子与信息工程学院, 江苏 苏州 215011)

摘 要: CPU 芯片内部温度的准确测量是保证微处理器发挥最佳性能和提高芯片可靠性的重要前提. 在对晶体管参数热效应进行理论分析的基础上, 提出一种基于晶体管集电极电流热效应的片上热敏元件方案, 推导和仿真证实所提方案元件具有较高的转换灵敏度. 在对 CPU 芯片热点温度场进行理论分析的基础上, 建议一种根据温度场分布特点的拐点圆上敏感元件对称布局方案, 推导证实所提方案可改善测量精度.

关键词: CPU 芯片; 温度; 热敏元件; 灵敏度; 精度

中图分类号: TP302; TN406

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2011)09-0115-04

Study on on—CPU—Chip Thermal Sensors and Their Layout

SHI Jiao-fang¹, SU Pin-gang², WANG Jian³

(1 Center of Compute, Suzhou Institute of Art and Design Technology, Suzhou 215104, China;

2 School of Electronic Information, Suzhou Vocational University, Suzhou 215104, China;

3 School of Elect. & Infor. Engin., Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215011, China)

Abstract: Accurate measurement of CPU chip's temperature is the important precondition for assuring the performance of microprocessor and for promoting the chip's reliability. On the basis of theoretical analysis of thermal effect of transistor parameters, a kind of high sensitive on—CPU—chip thermal sensor which is based on the thermal effect of transistor collector current is proposed. On the basis of theoretical analysis of hotspot's thermal field in CPU chip, a kind of high accurate on—CPU—chip thermal sensor array is proposed. Both proposals are proved by deduction and simulation.

Key words: CPU chip; temperature; thermal sensor; sensitivity; accuracy

1 引言

CPU 芯片内晶体管数量遵从摩尔定律增加, 芯片温度急剧升高, 对芯片性能及可靠性构成了极大威胁^[1]. 为了提高 CPU 芯片及计算机系统可靠性、保证微处理器发挥最佳性能^[2], 首要前提是提高片上温度测量的灵敏度和精度. 文献[3—4]介绍了芯片内置温度传感器技术的发展及现状. 文献[5—6]对现有技术的改进提出了思路 and 设想.

文中指出了传统热效应的传统热敏元件的不足, 提出基于双极型晶体管 (bipolar junction tran-

sistor, BJT) 集电极电流热效应的热敏元件方案并分析其提高灵敏度的原理, 进一步分析了多敏感元件拐点圆对称布局的设想.

2 现有 CPU 片上热敏元件

2.1 测量核间温度的热 PN 结

Intel 和 AMD 均采用植入式热 PN 结作为 CPU 片上热敏元件^[4], 其原理是二极管恒定正向电流引起正向电压随温度 T 上升而减小, 该关系表现为 $V_{BE}(T)$ 与 $I_C(T)$ 服从下式

$$V_{BE}(T) = V_{G0} -$$

收稿日期: 2011-01-11; 修回日期: 2011-02-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(60970058/F020509)

$$\left[\frac{V_{G0} + V_{BE}(T_r)}{T_r} + \frac{k}{q} \ln \frac{T_r^\eta}{T^\eta} + \frac{k}{q} \ln \frac{I_C(T)}{I_C(T_r)} \right] \cdot T \quad (1)$$

其中, T 和 T_r 为开氏温度, V_{G0} 为半导体在绝对零度下的禁带电压, k 为波尔兹曼常数, q 为电子电荷量, 常数 η 与硅 PN 结的结构有关. 当用两个电流强度代入式(1)后, 得电压之差为

$$\begin{aligned} \Delta V_{BE}(T) &= V_{BE2}(T) - V_{BE1}(T) \\ &= \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{I_{C2}}{I_{C1}} \right) \end{aligned} \quad (2)$$

温度 T 与电压差 ΔV_{BE} 成正比, 与二极管初始正向电压、物理尺寸、漏电流以及其他特性无关.

2.2 测量核内温度的数字热敏元件及其布局

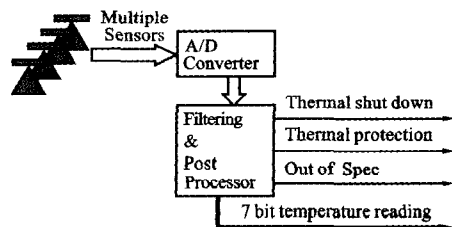
CPU 芯片制造商在采用二极管热敏元件测量核间温度之后, 又推出了测量核内温度的数字热敏元件^[4] (digital thermal sensor, DTS) (图 1a). 核内热源处的多个热 PN 结测量值被转换为 7 位数字量, 其值是偏离最大允许温度 T_{jmax} 的偏移量, 如 0 代表 CPU 正处于 T_{jmax} , 1 代表其温度比 T_{jmax} 低 1°C . 每个 DTS 的特性都经过测试且其 T_{jmax} 经过标定.

Intel 在其 DTS 中采用在热源周围布放热 PN 结的方式^[5] (图 1b). 现有芯片设计技术中一种实用做法是在热源四周大致均匀摆放 4 个热 PN 结及在热源位置加放第 5 个热 PN 结, 意在对多个热 PN 结测量值进行综合误差处理后得到精确的核内热源温度值.

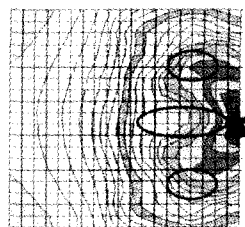
2.3 现有技术的不足

DTS 和二极管都是基于 PN 结伏安特性热效应, 其机理决定了现有热敏元件的最大灵敏度和线性范围. 芯片厚度和封装材料的不均质所造成的热传导不均匀, 会导致温度场和热点位置不确定, 从而无法将热敏元件准确地植于热点及其附近以期获得较大的灵敏度^[5-6].

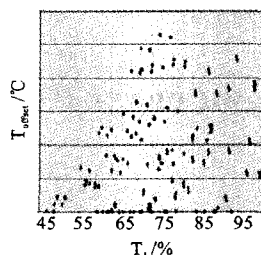
二极管热敏元件测量不仅存在偏差, 且在不同 CPU 工作负荷下, 偏差具有不确定性^[5] (图 1c). 因为工作负荷本身难以精确量化, 二极管测量误差也就无法确定, 这使补偿偏移量以减小单个二极管测量误差的方法难以实现. 采用热敏元件阵列并对多测量值综合处理无疑是提高测量精度的有效方法, 但现有布局方案没有很好考虑温度场的不确定特点, 单个 PN 结测量偏差及数据综合处理效果均受到很大影响.



(a) Intel 植入式数字热敏元件



(b) DTS 中热 PN 结的环绕布放



(c) Intel Core Duo 芯片实测温度

图 1 CPU 片上热敏元件及其布放

3 基于集电极电流热效应的热敏元件

文中提出基于 BJT 集电极电流热效应的晶体管热敏元件及电路的测温方案, 以改善二极管热敏元件和 DTS 的测量灵敏度.

3.1 集电极电流的温度灵敏度

工作在放大状态的硅管的集电极电流 I_C 可表为^[7]

$$I_C \propto \exp\left(\frac{qV_{BE} - E_G}{kT}\right) \quad (3)$$

对式(3)求偏导数得

$$\left. \frac{\partial I_C}{\partial T} \right|_{V_{BE}} = I_C \cdot \frac{qV_{BE} - E_G}{kT^2} \quad (4)$$

$$\left. \frac{\partial V_{BE}}{\partial T} \right|_{I_C} = \frac{qV_{BE} - E_G}{qT} = V_{BE} \cdot \frac{qV_{BE} - E_G}{qT V_{BE}} \quad (5)$$

将硅的禁带宽度 E_G 、常用发射结电压 V_{BE} 和室温等值代入式(4)(5), 各得 $\frac{1}{I_C} \cdot \frac{\partial I_C}{\partial T} = 0.054/^\circ\text{C}$ 和 $\frac{1}{V_{BE}} \cdot \frac{\partial V_{BE}}{\partial T} = -0.002/^\circ\text{C}$. 可见, 就相对灵敏度比较, I_C 已是 V_{BE} 的 27 倍. 进一步地, 若 V_{BE} 取 0.7V , 则温度每升高 1°C , V_{BE} 减少 1.4mV ; 而若 I_C 取 1mA , 则温度每升高 1°C , I_C 增加 0.054mA , 使此电

流流经一个 200Ω 的半导体体电阻,则产生 10.8mV 的电压增量.可见在通过电阻转换后集电极电压增量很容易比基极电压增量大一个量级.

3.2 晶体管热敏元件及仿真

用两个偏置电压代入式(3),并考虑多个集电极电流经过同一个电阻的情况,可得温度 T 与两个集电极电压之比对数的关系如下式

$$\begin{aligned} \ln V_{C2} - \ln V_{C1} &= \ln \frac{V_{C2}}{V_{C1}} \\ &= \ln \left(\frac{\sum I_{C2}}{\sum I_{C1}} \right) = \frac{q}{k} (V_{BE2} - V_{BE1}) \cdot \frac{1}{T} \quad (6) \end{aligned}$$

文中采用多个热敏晶体管并联结构的热敏元件(图2a),多个集电极流经同一电阻可进一步提高灵敏度.图2(b)是单管、两管、三管下的 $\ln V_{C2} - \ln V_{C1}$ 值随温度变化的规律,证实灵敏度是加大的.

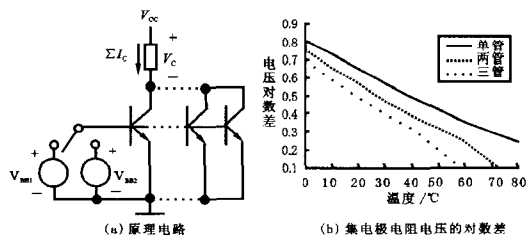


图2 多管并联的晶体管热敏元件及其仿真结果

二极管串联固然也可提高测量灵敏度,但八个二极管串联电压的灵敏度方与一个晶体管相当.芯片内二极管由BJT短接构成,两者所需空间相同,所以文中采用晶体管并联方案.

4 误差相抵的热敏元件布局

文中提出利用热点温度场特征以减小总测量偏差的敏感元件拐点圆对称布局方案.

4.1 片上点热源及其温度场特征

CPU片上热源产生的热量取决于CPU执行的任务^[8],热点温度场分布是热源及热传导的结果.考虑CPU长时间执行同一任务,此时热源为恒定点热源,同时把芯片看成薄平板,芯片上温度场简化为二维场.根据热传导理论,在各向均匀传导情况下距热点距离为 r 的同心圆上任一点在时刻 t 的温度 T 服从下式

$$\begin{aligned} T(r, t) &= \frac{Q}{2\pi\lambda r} \left(1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\frac{r}{\sqrt{4\alpha t}}} e^{-u^2} du \right) \\ &= \frac{Q}{2\pi\lambda r} \operatorname{erfc} \left(\frac{r}{\sqrt{4\alpha t}} \right) \quad (7) \end{aligned}$$

其中, $\operatorname{erfc}(\cdot)$ 为余误差函数, Q 为热源在任意时刻放出的热量, α 为材料的热扩散比, λ 为管芯材料有

关的参数.图3是某款CPU芯片在某恒定负荷下的稳态温度场仿真结果^[9].图4是另一款CPU芯片在某恒定负荷下稳态温度场实测结果^[5].从图3温度分布曲线可见,存在一个拐点平面,拐点平面以上的温度曲面是上凸的,以下的温度曲面是下凸的.从图4可见拐点平面与温度曲面相交于一个圆,称之为拐点圆.

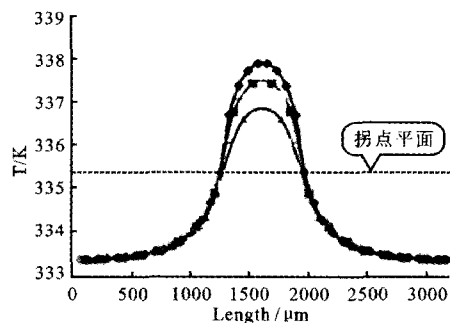


图3 热源附近温度稳态分布及拐点平面

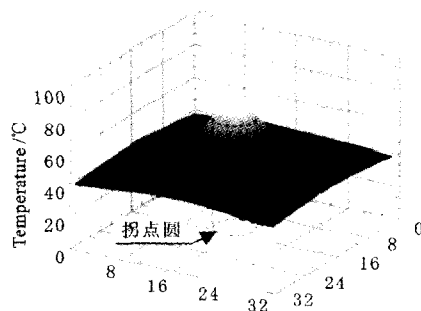


图4 热源附近实测温度稳态分布

拐点圆上关于中心(热点)对称的任意两点的理想温度值是相等的.若热点略微偏离热源,则由于温度场在拐点圆附近呈近似线性,任意两对称点的实测温度将发生大小相等、方向相反的偏差.如果对两个实测温度值予以合理计算,则偏差可得到消除.证明如下:

设热源位于原点处,热敏元件 N_i 与热源距离为 r ,但热点已偏离热源, N_i 与热点的实际距离为 $r - \Delta r$,其所处位置温度为 $T_i(r) + \Delta T_i$.与热敏元件 N_i 成中心对称的另一热敏元件 N'_i 与热点的实际距离为 $r + \Delta r$,其所处位置温度为 $T'_i(r) - \Delta T'_i$.设 $T_i(r) = T'_i(r) = T(r)$,则

$$\begin{aligned} 2T(r) + \Delta T_i(r) - \Delta T'_i(r) &= \frac{Q}{2\pi\lambda(r - \Delta r)} \left(1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\frac{r - \Delta r}{\sqrt{4\alpha t}}} e^{-u^2} du \right) + \frac{Q}{2\pi\lambda(r + \Delta r)} \left(1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\frac{r + \Delta r}{\sqrt{4\alpha t}}} e^{-u^2} du \right) \\ &= \frac{Q}{\pi\lambda} \left(\frac{r}{r^2 - \Delta r^2} - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \cdot \right. \end{aligned}$$

$$\frac{r}{r^2 - \Delta r^2} \int_0^{\frac{r+\Delta r}{\sqrt{4\alpha t}}} e^{-u^2} du + \frac{Q}{\pi \sqrt{\pi \lambda}} \cdot \frac{1}{r - \Delta r} \int_{\frac{r-\Delta r}{\sqrt{4\alpha t}}}^{\frac{r}{\sqrt{4\alpha t}}} e^{-u^2} du - \frac{Q}{\pi \sqrt{\pi \lambda}} \cdot \frac{1}{r + \Delta r} \int_{\frac{r}{\sqrt{4\alpha t}}}^{\frac{r+\Delta r}{\sqrt{4\alpha t}}} e^{-u^2} du \quad (8)$$

将式(8)两边除以2并注意到 $\Delta r \ll 1$, 取前两项值 $\frac{Q}{2\pi \lambda r} (1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \cdot \int_0^{\frac{r}{\sqrt{4\alpha t}}} e^{-u^2} du)$ 作为热敏元件 N_i 或 N'_i 的温度值, 后两项正负几乎完全相抵. 如果热敏元件布置的圆不是拐点圆, 则由于分布曲线的非线性, 不会产生温度偏差代数和近似为零的效果.

4.2 敏感元件阵列的布局与偏差

根据前述温度场特点, 文中在拐点圆上对称布置晶体管热敏元件, 利用多元件合理布局和测量数据的综合处理消除单个元件无法避免的缺陷.

均匀热传导形成的温度场是关于热源中心对称的, 两只在拐点圆上对称布置的热敏元件 A、B 所测温度是相等的(图 5a). 若热点偏离热源, 则热点处温度 T 满足

$$T = \frac{(T_A \pm \Delta T_A) + (T_B \mp \Delta T_B)}{2} + T_{\text{offset}} = T_A + T_{\text{offset}} \quad (9)$$

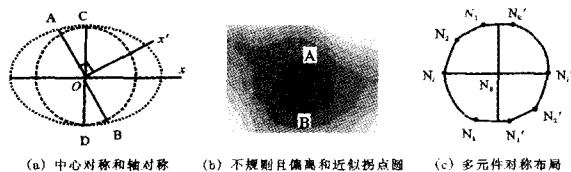


图5 温度场及敏感元件拐点圆上对称布局

温度补偿值 T_{offset} 可通过预先标定得到. 只有当热点沿 Ox' 方向偏离热源时, $\Delta T_A = -\Delta T_B$, 上式所得温度值为 $T_A \pm \Delta T_A + T_{\text{offset}}$, 偏差无法得到消除.

大致均匀热传导温度场不关于热源中心对称, 图(5a)所示为椭圆分布轴对称简单情况, 此时热敏元件 C、D 所测温度仍然具有偏差近似相抵特点, 除非当热点沿 Ox 方向偏离热源时, 偏差无法消除.

由于扩散运动的普遍规律, 即使非均匀热传导形成的实际温度场总体呈不规则形状, 但拐点线以内温度场较之以外温度场仍比较接近对称. 图 5(b)是某款 CPU 芯片一个实际热点附近温度场情况^[10], 其拐点线及其附近的等温线具有近似的中心对称性, 仍然可以认为存在一个近似拐点圆, 且其上热敏元件 A、B 所测温度偏差亦仍近似相抵.

文献[6]认为热敏元件的布置应考虑实际温度

分布的等温线. 文中进一步提出: 对同一型号 CPU 芯片均可考虑在近似拐点圆上成对植入敏感元件, 总数目在芯片空间允许条件下尽可能多(图 5c). 当热点偏离热源时, 由于温度场的中心对称性, 热敏元件 $N_1, N_2, \dots, N_k$ 所测温度偏差 $\Delta T_i \geq 0$, ($i = 1, 2, \dots, k$), 而热敏元件 $N'_1, N'_2, \dots, N'_k$ 所测温度偏差 $\Delta T'_i \leq 0$, ($i = 1, 2, \dots, k$), 并且满足下式

$$\lim_{k \rightarrow \infty} \left(\sum_{i=1,2,\dots,k} \Delta T_i - \sum_{i=1,2,\dots,k} \Delta T'_i \right) = \pm 2\Delta T_h \quad (10)$$

其中, ΔT_h 是热敏元件 N_h 的温度偏差, 而热点偏离热源的方向垂直于 N_h 和 N'_h 的连线.

应该指出, 从偏差抵消角度看, 图 5(c) 热源处单个热敏元件 N_0 的温度偏差是无法消除的, 因而其布放是不必要的. 但从可靠性角度看, 又需要热源处的单个元件 N_0 尽快感受热击穿临界温度的风险. 实际上计算机在 CPU 芯片高温时采取关机的临界温度就是半导体 PN 结热击穿温度 80°C .

5 结束语

针对传统片上热敏元件灵敏度不高的问题, 提出了基于集电极电流热效应的晶体管热敏元件, 并通过推导证明了其合理性. 在分析 CPU 芯片热点温度场分布特点及规律的基础上, 提出了在温度场拐点圆上等间隔均匀摆放热敏元件的阵列式布局, 并通过误差分析与推导证明了其合理性. 后续工作包括全面的电路温度仿真分析、瞬时点热源和时变点热源及其热传导过程中的温度场分布特征分析, 非各向均匀热传导温度场分布特征分析, 以及各种非理想温度场对热敏感元件布局的影响研究, 最后在集成电路设计制造实际中进行的应用性试验.

参考文献:

- [1] Zhang S, Chathe K S. Approximation algorithm for the temperature-aware scheduling problem[C]// International Conference on Computer-aided Design. USA: San Jose, 2007: 281-288
- [2] 夏亮, 祝永新. 温度感知的调度算法研究与实现[J]. 微电子学与计算机, 2009, 26(7): 237-240
- [3] Moonat M. Using the on-chip thermal diode on analog devices processors[R]. Analog Devices: Technical notes on using Analog Devices DSPs, processors and development tools Rev 2, 2010.
- [4] Rotem E, Hermerding J, Aviad C, et al. Temperature

(下转第 122 页)

冲去交错的影响. 脉冲载频和重频常常作为去交错依据, 在进行干扰抑制时, 其容差需要根据 RMS 值作相应调整, 否则可能带来虚警.

5 结束语

文中对脉冲检测中的窄带干扰抑制问题进行分析, 提出了一种数字调谐和一阶陷波解决方案, 并推导了相应的干扰抑制条件. 在 FPGA 上实现了干扰抑制器的电路设计, 具有结构简单, 实现代价小, 可独立工作的特点. 实验结果表明, 经过干扰抑制后的脉冲参数估计 RMS 值, 与信干比和频率间隔成单调关系. 在满足频率间隔条件下, 干扰抑制器能够滤除窄带干扰, 实现正确的脉冲信号参数估计.

参考文献:

- [1] 李朝伟, 周希元, 刘福来. 雷达/通信信号侦察一体化技术[J]. 舰船电子对抗, 2008, 31(2): 5-11.
- [2] Zahimiak R, Sharpin L, Fields W. A hardware-efficient, multirate, digital channelized receiver architecture[J]. IEEE Tran on Aerospace and Electronic Systems, 1998, 34(1): 137-152.
- [3] 韩煜, 赵艳, 张东坡. 一种数字宽带截获接收机的高效实现[J]. 通信对抗, 2010(1): 51-54.
- [4] 安秀娟, 张东坡, 文连国. 一种强连续波干扰下的宽带脉冲检测方法[J]. 舰船电子对抗, 2010, 33(1): 97-100.
- [5] Capozza P T, Holland B J, Hopkinson T M. A single-chip narrow-band frequency-domain excisor for a global positioning system (GPS) receiver[J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2000, 35(3): 401-411.
- [6] Michael H, Michail K T. Adaptive techniques for multi-user CDMA receivers[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2000: 49-52.
- [7] 张伟, 周力. 一种改进的 DSSS 系统自适应干扰抑制技术[J]. 微电子学与计算机, 2009, 26(12): 75-77.
- [8] 张兵, 汤清华, 吴国安, 等. 基于 DSP 的数字正交解调器的设计与实现[J]. 微电子学与计算机, 2009, 26(7): 35-38.
- [9] Wiley R G. Electronic intelligence: the interception of radar signals[J]. Dedham, MA: Artech House Publishers, 1985.

作者简介:

韩煜 男, (1975-), 工程师, 研究方向为宽带数字接收机算法及其实现.

张东坡 男, (1975-), 高级工程师, 研究方向为雷达信号处理.

彭小名 男, (1974-), 高级工程师, 研究方向为通信信号处理算法及其实现.

赵艳 女, (1982-), 工程师, 研究方向为通信信号处理算法及其实现.

(上接第 118 页)

- measurement in the intel core duo processor[C]//. Proc. of 12th Int'l Workshop on Thermal investigation of ICs. France; Nice, 2006, 23-27
- [5] Young Han, Sung Jin Kim. Diode temperature sensor array for measuring micro-scale surface temperatures with high resolution[R]. Department of Mechanical Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology. Korea, 2008: 52-58.
- [6] Wu W, Jin L L, Yang J, et al. Efficient power modeling and software thermal sensing for runtime temperature monitoring[J]. ACM Transaction on Design Automation of Electronic Systems, 2007, 12(3): 26.
- [7] 陈星弼, 张庆中. 晶体管原理与设计[M]. 北京: 电子工业出版社, 2006: 144
- [8] 苏蓉, 郭春生, 冯士维, 等. 基于有限元分析的集成电路瞬态热模拟[J]. 微电子学与计算机, 2010, 27(5): 74-77
- [9] Giacomo Paci, Francesco Poletti, Luca Benini, et al. Exploring temperature-aware design in low-power MP-SoCs[J]. International Journal of Embedded Systems, 2007 3(1/2): 43-51.
- [10] Stephen H Gunther, Frank Binns, Douglas M Carmean, et al. Managing the impact of increasing microprocessor power consumption[J]. Intel Technology Journal Q1, 2001, 5(1): 22-25.

作者简介:

施教芳 女, (1966-), 硕士, 副教授. 研究方向为计算机应用技术.

苏品刚 男, 副教授.

王俭 男, 教授.