

全集成式流量传感器*

黄金彪 李斌 童勤义 周明

(南京工学院微电子中心)

(扬州半导体厂)

1988年2月4日收到

本文介绍了利用恒定芯片温度原理工作的全集成式流量传感器,它由三部分组成。CMOS温度敏感级、CMOS运放和加热部分,这三部分由CMOS工艺集成在同一芯片上,不需附加工艺。本文在给出温度敏感级的理论分析和流量传感器工作原理的介绍后,报道了传感器用于气体流速(氮气)和液体(水)流速的测量结果,结果表明,该传感器具有如下特点:输出电平和灵敏度高(在传感器芯片温度 T_c 与流体温度 T_f 之差为 15°C 、流速 V_f 为 50cm/s 的氮气条件下,传感器的输出可达500毫伏);响应时间快(在 $T_c - T_f = 5^\circ\text{C}$ 、 $V_f = 50\text{cm/s}$ 时,响应时间为7秒);芯片尺寸小($2.02 \times 1.62\text{mm}^2$);成本低(因用普通工艺);用单5伏电源工作与微处理机自然接口等。对水流流速的试验还表明,该传感器特别适合于低流速水的测量。

关键词: 传感器,流量传感器,集成传感器,CMOS温度传感器

一、引言

流量传感器是传感器领域中一个重要的分支。传统的流量计的研究和使用历史已经很长,但它们具有体积庞大、安装复杂、准确度差和与信号处理电路兼容性差等缺点,特别是在一些特殊应用的领域,传统的流量计已不能胜任,例如在地质勘探部门和水利部门等要求对低流速(如:几厘米/秒甚至更低)水的测量,传统的测量方法(如叶轮式流速仪的下限为几十厘米/秒)很难实现。在这样的情形下,半导体流量传感器应运而生,由于它体积小、具有批量生产能力从而成本低,与信号处理电路具有良好的兼容性、准确性高和可靠性高等显著优势很快得到人们的重视。我们于1985年用CMOS工艺首次实现了利用恒定芯片温度工作模式的集成流量传感器^[1,2],工作表明:集成化的发展是提高传感器性能的一条有效途径,因为它不仅可以把信号处理电路与传感器集成在一起提高系统的信噪比,而且还可以减少环境温度、湿度等(通过外接元件)对传感器性能的影响。为了进一步开发集成化带来的优势,减少环境的影响,我们又研制成了全集成式的流量传感器,下面在第二部分介绍其组成及工作原理,第三和第四部分给出实验结果和结论。

二、组成和工作原理

全集成式流量传感器由以下三部分组成(如图1所示):①温度敏感级,由二极管D

* 国家自然科学基金资助项目(6866009)。

和 MOS 管 Q_1 — Q_2 组成。D、 Q_1 和 Q_2 为温度敏感支路， Q_3 和 Q_4 为偏置电路提供 Q_1 管一定的偏置电压。电位 V_1 为温度敏感级的输出。②运放 A，它为单电源工作的 CMOS 运放。③加热支路，由 MOS 管 Q_5 和扩散电阻 R 组成，该支路提供传感器芯片一定的加热功率使芯片温度高于流体温度，电阻 R 两端的电压表征了加热电流的大小也即为该传感器的输出。这三部分由 CMOS 工艺集成在同一芯片上。

1. 温度敏感级的工作原理

在温度敏感级中起温度敏感作用的主要是二极管 D、 Q_1 主要起恒流源作用，由于这两者集成在同一芯片上，恒流源的电流也是温度的函数，所以其输出的温度性能应该综合考虑。在图 1 中，描述二极管 D 和 MOS 管 Q_1 、 Q_2 （其中假定 Q_1 工作在饱和区）的方程分别为：

$$I = I_0 \exp(qV_F/kT) \quad (1)$$

$$I = \frac{1}{2} S_1 \mu C_{ox} (V_{GS1} - V_T)^2 \quad (2)$$

$$I = \frac{1}{2} S_2 \mu C_{ox} (V_{GS2} - V_T)^2 \quad (3)$$

其中 I_0 、 V_F 分别为二极管的反向饱和电流和正向电压， S 、 μ 、 C_{ox} 、 V_T 和 V_{GS} 分别为 MOS 管的宽长比、迁移率、单位面积氧化层电容、阈值电压和栅源电压， I 为敏感支路的电流。温度敏感级的输出电压及其温度系数分别为：

$$V_1 = V_{DD} - V_{GS2} - V_F \quad (4)$$

$$\frac{dV_1}{dT} = - \frac{dV_{GS2}}{dT} - \frac{dV_F}{dT} \quad (5)$$

(3)式两边对温度求导得：

$$\frac{dV_{GS2}}{dT} = \frac{dV_T}{dT} + \frac{(V_{GS2} - V_T)}{2} \left(\frac{1}{I} \frac{dI}{dT} - \frac{1}{\mu} \frac{d\mu}{dT} \right) \quad (6)$$

同样，由(1)(2)两式求得：

$$\frac{dV_F}{dT} = \frac{1}{T} V_F + \frac{kT}{q} \left(\frac{1}{I} \frac{dI}{dT} - \frac{1}{I_0} \frac{dI_0}{dT} \right) \quad (7)$$

$$\frac{1}{I} \frac{dI}{dT} = \frac{1}{\mu} \frac{d\mu}{dT} - \frac{2}{(V_{GS1} - V_T)} \frac{dV_T}{dT} \quad (8)$$

把(8)式代入(6)式得：

$$\frac{dV_{GS2}}{dT} = \frac{dV_T}{dT} - \frac{(V_{GS2} - V_T)}{(V_{GS1} - V_T)} \frac{dV_T}{dT} \quad (9)$$

根据(9)式并结合(2)(3)两式，我们设计 Q_1 与 Q_2 具有相同的尺寸即 $S_1 = S_2$ ，则 $V_{GS1} = V_{GS2}$ ，从而可以获得具有零温度系数的 V_{GS2} ，即 $\frac{dV_{GS2}}{dT} = 0$ ，因此

$$\frac{dV_1}{dT} = - \frac{dV_F}{dT} \quad (10)$$

上式说明：温度敏感级的温度系数即为单个二极管的温度系数，只是符号相反，下面具体

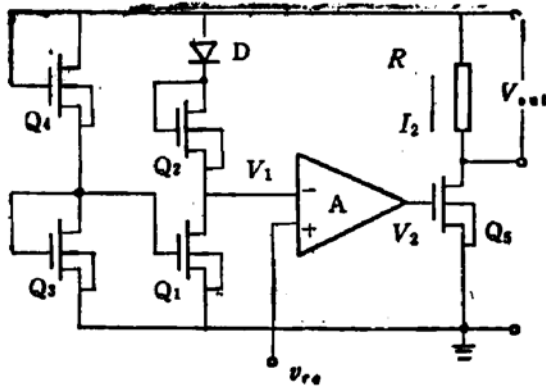
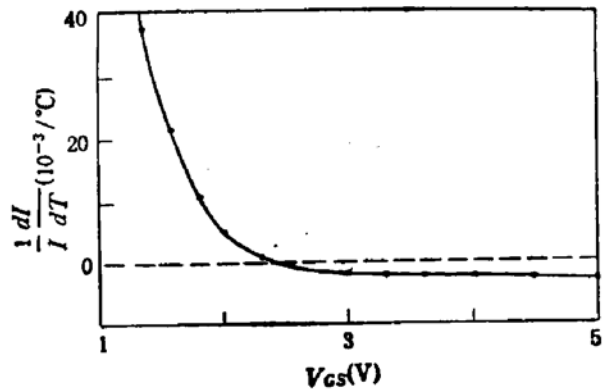


图1 全集成式流量传感器电路结构图

图2 NMOS管漏电流的相对温度系数与栅压的实验曲线在 $T = 40^{\circ}\text{C}$, $V_T = 1.6\text{V}(1-7^{\mu})$

考虑 V_F 的温度系数(7)式, 将其重写如下:

$$\frac{dV_F}{dT} = \left(\frac{1}{T} V_F - \frac{kT}{qI_0} \frac{dI_0}{dT} \right) + \frac{kT}{qI} \frac{dI}{dT} \quad (11)$$

上式右端第一项为不考虑恒流源 I 的温度效应时二极管正向电压的温度系数, 大家知道, 这项的值约为 $-2\text{mV}/^{\circ}\text{C}$, 第二项表示恒流源温度系数的影响, 其大小由(8)式的值决定。对 NMOS 管而言, 由于迁移率 μ 和阈值电压 V_T 的温度系数均为负, 所以由(8)式可以看出不同的 V_{GS} , 不但可以决定电流温度系数的大小, 而且可以决定温度系数的正负^[9]。图2是描述 NMOS 管温度性能的一组实验曲线^[9], 从图中可以看出, 设计较大的栅压 V_{GS} 可以获得 I 的负温度系数, 从而与(11)式中第一项相互加强。从图2中还可以看出, 在电流的负温度系数区域, 温度系数的量值一般均很小, 所以在(11)式中起主导地位的仍是第一项。

总之该温度敏感级温度系数的大小约为一个二极管正向电压的温度系数, 其符号为正。

2. 全集成式流量传感器的工作原理

根据传热学原理, 在流体中电加热的芯片(设温度为 T_c) 与周围环境进行如下形式的热交换: ①从电源中获取电功率 IV_{DD} , ②与流体(设温度为 T_f , 显然 $T_f < T_c$) 进行对流换热散失热量, ③通过传感器封装热传导散失热量。根据能量守恒原理有如下方程式成立:

$$I_2 V_{DD} = \alpha A (T_c - T_f) + (T_c - T_f) / R_T \quad (12)$$

其中 α 为对流换热系数, A 为芯片换热面积, R_T 为封装热阻。根据文献[4]并结合传感器芯片的具体形状可以求得, 换热系数为:

$$\alpha = \begin{cases} 0.664 \frac{\lambda}{l} \left(\frac{IV_f}{\gamma} \right)^{\frac{1}{4}} P_r^{-\frac{1}{4}} & (V_f \neq 0 \text{ 时}) \\ \frac{\lambda}{l} f(G_r, P_r) & (V_f = 0 \text{ 时}) \end{cases} \quad (13)$$

其中 V_f 为流速, l 为沿流速方向上芯片的长度, λ , γ , P_r 和 G_r 分别为流体的导热系数、运动粘度、普朗特数和葛拉晓夫准则, f 表示某种函数关系, 一般由实验曲线查出其函数

值⁽⁴⁾。(13)、(14)两式分别表示强迫对流换热和自然对流换热,其中(13)式隐含的前提是流体为层流状态,即雷诺数 $Re = \frac{IV_f}{\gamma}$ 应小于 2×10^3 , 在我们实验中所用的流速范围均满足这个条件。把(13)(14)两式代入(12)式得:

$$I_2 V_{DD} = 0.664 \frac{\lambda}{l} \left(\frac{IV_f}{\gamma} \right)^{\frac{1}{2}} Pr^{\frac{1}{3}} A(T_c - T_f) + (T_c - T_f)/R_T \quad (V_f \approx 0 \text{ 时}) \quad (15)$$

$$I_2 V_{DD} = \frac{\lambda}{l} f(G_r, Pr) A(T_c - T_f) + (T_c - T_f)/R_T \quad (V_f = 0 \text{ 时}) \quad (16)$$

由(15)式可以看出,若维持 $(T_c - T_f)$ 恒定,加热电流 I 就是流速 V_f 的单调函数,也可作为 V_f 的量度。流体温度通常为常数,因而控制芯片温度恒定成为设计的关键,而(15)、(16)两式为传感器的设计提供了定量依据。

在上面分析的基础上结合图 1 我们简述该传感器的工作原理。当流体流过电加热的芯片时,因对流换热芯片温度有一下降趋势,这使得温度敏感级的输出 V_i 下降,经运放的反相放大其输出 V_o 增加,从而加热支路的加热电流 I_2 增加,使芯片温度又有一回升,很显然,只要运放的增益足够大,芯片温度就可以恢复到原来的温度,即芯片温度维持恒定,但此时的加热电流增加了,就用这个维持恒温的加热电流作为流速的量度。我们把这样的原理称为恒定芯片温度 (CCT) 原理。

另外,通过保持芯片温度与流体温度之差恒定取代芯片温度恒定可以实现温度补偿的目的,图 3 给出了利用流量传感器中温度敏感级测量流体温度进行温度补偿的电路图,其输出接到图 1 中运放的正输入端,调节电位器 W 可以设定不同的温度差。这种结构需要增加一个测量流体温度的探头,但用合适的厚膜工艺可把它与流量传感器封在一个封装里,利用一些特殊的工艺甚至可以把这两者集成在同一芯片上⁽⁵⁾,有关这方面的工作我们正在进一步探索。

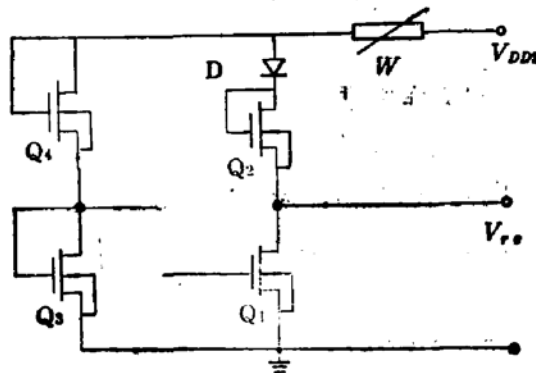


图 3 进行流体温度补偿的温度探头

三、实验结果

我们设计了按上述原理工作的全集成式流量传感器,并经普通铝栅 CMOS 工艺流水试制成功,传感器的芯片尺寸为 $2.02 \times 1.62 \text{ mm}^2$, 其电路结构如图 1 所示。把流出的芯片经适当的封装保护,然后进行温度和流速敏感试验,图 4 是温度敏感级的温度特性,图

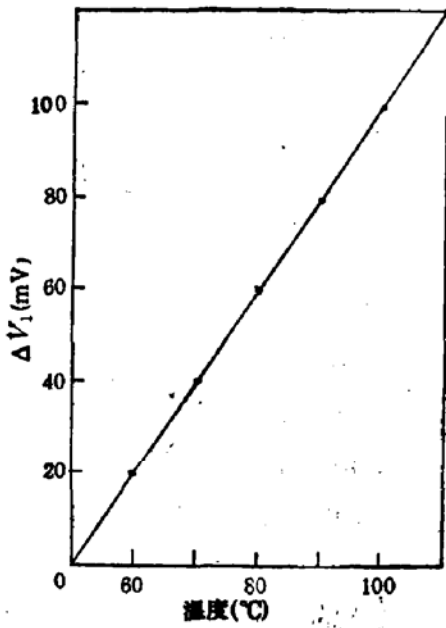


图4 温度敏感级的输出随温度的变化(3#)
 $dV_1/dT = 2\text{mV}/^\circ\text{C}$

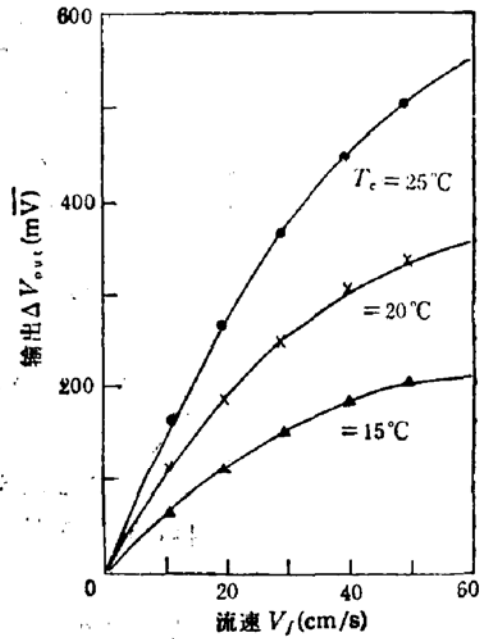


图5 不同芯片温度下传感器的输出与氮气流速的实验曲线(13#)
 $N_2, T_1 = 10^\circ\text{C}$

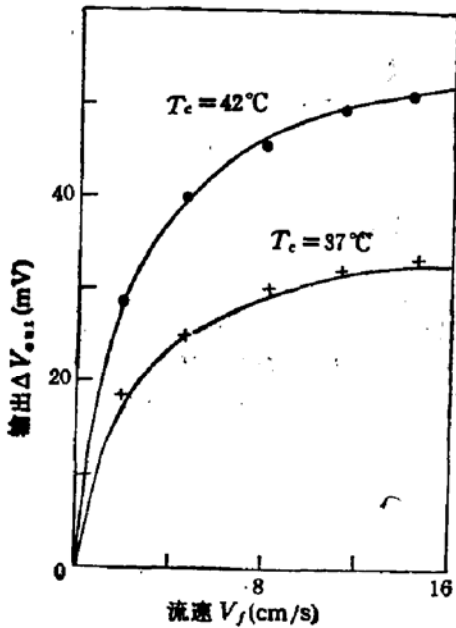


图6 传感器对水流流速的试验曲线 (Z-3#)
 $H_2O, T_1 = 26^\circ\text{C}$

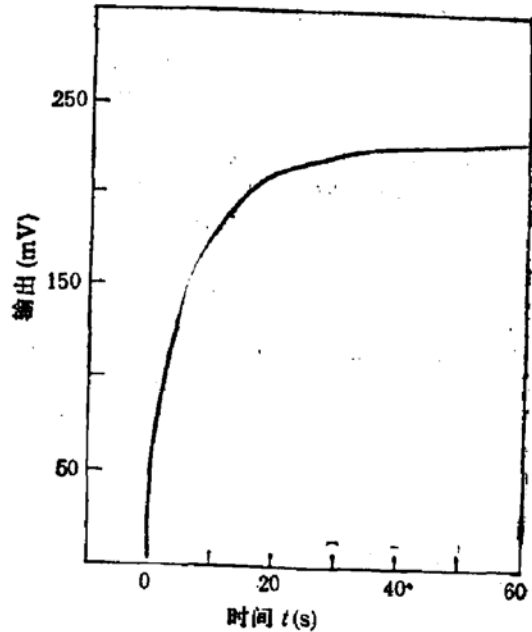


图7 传感器的输出对氮气阶跃的响应曲线(1#)
 $N_2, T_c - T_1 = 5^\circ\text{C}, V_j = 50\text{cm/s}$

5 和 6 分别为传感器对氮气和水流流速的敏感实验曲线，可以看出温度敏感级的温度系数近似为二极管的温度系数，与前面的讨论一致；流量传感器的输出近似与流速的平方根成正比、与 $(T_c - T_1)$ 成正比，这与(15)式预计的一致。图 7 是用 X-Y 记录仪记录的传感器输出对氮气流速阶跃的动态响应曲线，按输出上升到 63.2% 的最大值计算^[6]，其响应时间为 7 秒。表 1 给出了五个传感器样品的重复性数据，其测试条件为 $T_c - T_1 = 5^\circ\text{C}$ ， $V_j = 0.4\text{m/s}$ ，在该条件下连续测量两次，然后由极差法公式得出表 1 中的结果。

表 1 传感器的重复性测量结果

编 号	10	11	13	15	16
重复性	1.2%	0.8%	1.0%	1.7%	1.2%

四、结 语

利用恒定芯片温度工作原理的 CMOS 全集成式流量传感器已经研制成功, 该传感器与国际上其它半导体流量传感器^[6-8]相比具有如下优点: 灵敏度高(在 $T_c - T_f = 5^\circ\text{C}$ 、 $V_f = 25\text{cm/s}$ 的氮气条件下, 灵敏度可达 400mV/m/s); 芯片尺寸小 ($2.02 \times 1.62\text{mm}^2$); 成本低(因利用常规工艺); 响应时间较快(约为 7 秒)。这些结果比我们以前的工作^[1,2]也有了很大改善。

目前在地质勘探部门、水工和煤炭等部门迫切需要解决水的低流速测量问题。由图 6 可看出, 该传感器在水流的低流速范围有较高的灵敏度, 可望在水的低流速、微流速领域提供一条廉价高性能的途径, 当然这还要在噪音对传感器性能的影响、合理的封装设计等方面进一步进行研究。

参 考 文 献

- [1] 董勤义、黄金彪, 电子学报, 15, 112(1987).
- [2] Tong Qinyi, Huang Jinbiao, *Sensors and Actuators*, 12, 9(1987).
- [3] 黄金彪, 南京工学院硕士论文, (1986).
- [4] A. J. Champman, *Heat Transfer*, Macmilan Pub. Co. Inc., (1974).
- [5] O. Tabata, *IEEE Trans. Electron Devices*, ED-33, 351(1986).
- [6] Y. C. Tai, R. S. Muller, *TRANSDUCERS'87*, 360(1987).
- [7] D. L. Polla, R. S. Muller, R. M. White, *IEDM'83*, 639(1983).
- [8] J. H. Huijsing, J. P. Schuddemat, W. Verhoef, *IEEE Trans. Electron Devices*, ED-29, 133(1982).
- [9] 董勤义、黄金彪, 中国专利, 专利号: 85204747, 1987年4月21日授权。

A Fully Integrated Flow Sensor

Huang Jinbiao, Li Bin, Tong Qinyi

(Microelectronics Center, Nanjing Institute of Technology)

Zhou Ming

(Yangzhou Semiconductor Factory)

Abstract

A Fully integrated flow sensor utilizing constant chip temperature principle is presented. It is composed of CMOS temperature sensing stage, CMOS op. amp. and heating part, which are integrated on one chip by a conventional CMOS process. After giving the theory analysis of the temperature sensing stage and the introduction of the principle of the flow sensor, measurement results of the flow velocity values of nitrogen and water by using the sensor are reported. The results show that the sensor has the following features: high output level and sensitivity (500 mV output at $V_s=50$ cm/s and $T_s-T_f=15^\circ\text{C}$) as well as reasonable response time (7s at a step change of flow velocity in 50 cm/s and $T_s-T_f=5^\circ\text{C}$). The sensor chip size is 2.02×1.62 mm and it works under a single 5 V power supply.

KEY WORDS: Sensor, Flow sensor, Integrated sensor, CMOS temperature sensor