

新型集成压力传感器的研究

张维新 毛赣如 曲宏伟 姚素英 李建文

(天津大学电子工程系 天津 300072)

摘要 本文介绍一种新型集成压力传感器。它是利用集成电路技术和微机械加工技术相结合，将半导体力敏电阻和双稳态触发器电路结合在一起，制作触发器型集成压力传感器。文章对该类传感器的工作原理，电路结构进行了理论分析，并对实验结果进行了讨论。重点分析了噪声对传感器特性的影响，在测试电路中加入调控三角波电压，可以改善传感器的特性。

EEACC: 7230

1 引言

目前测量使用的传感器，多数为模拟量输出，不便于与计算机控制系统接口。最近，S. Middelhoek 提出一种新型的具有数字量输出的高灵敏度的传感器^[1]。这类传感器是将敏感元件设计在触发器电路中，成为一个完整的电路，然后利用集成电路技术制作在同一半导体芯片上^[2]。这种新型集成传感器可以制成各种不同敏感量的传感器。本文以压力传感器为例，研究这类传感器的工作原理及其特性。

2 理论分析

如图 1 所示的触发器电路中，当接通集电极电源 V_P 时，触发器的触出状态有三种可能：(1)输出高电平“1”；(2)输出低电平“0”；(3)输出保持在“0”与“1”之间的某一中间电平。电路最后处于哪一种状态，则取决于电路内部的结构及其外部条件。当电路内部结构完全对称，外部不存在任何干扰的情况下，触发器的输出有可能保持在第(3)种状态下。但是，这种情况实际上不可能维持。首先，触发器电路不可能作到完全对称，同时也难以保证外部不存在任何干扰。当电路存在不对称或外界条件存在微小干扰信号，使输出端电平升高(或降低)时，由于触发器中两个晶体管彼此连接成正反馈放大器，因而迅速将这一微小的信号放大，最后使触发器终止在输出高电平(或低电平)的状态。影响输出高电平或低电平的因素可以归纳

张维新 男，1936 年生，教授，从事微电子技术和半导体传感器方面的教学和研究工作
毛赣如 女，1938 年生，副教授，从事微电子技术和半导体传感器方面的教学和研究工作
1995 年 6 月 21 日收到初稿，1995 年 11 月 3 日收到修改稿

为四个方面:(1)剩余电荷 Q_R . 当触发器在脉冲电源 V_P 驱动下工作,电源脉冲处于高电平时,其中一个晶体管处于饱和态,有较多的贮存电荷. 另一个晶体管处于截止态,贮存电荷较少. 电源脉冲处于低电平时,晶体管将通过负载电阻放电. 当电源脉冲 V_P 频率较高时,在下一个脉冲到来之前,处于饱和态的晶体管中的贮存电荷有可能没有完全放尽,存在剩余电荷 Q_R ,可以用等效电压 V_Q 表示,(2)电路元件不对称. 在实际工艺制造过程中,触发器两边的元件不可能完全对称,由此产生的失调可以用等效电压 V_A 来表示.(3)噪声. 噪声对触发器从非稳态向稳态转化是极其重要的. 噪声来源主要有:热噪声,散粒噪声和 $1/f$ 噪声. 这些噪声是随机的正态分布. 可以用等效电压 V_N 来表示.(4)被测量的敏感信号 V_M . 上述四个因素可以用图 2 的等效电路来表示.

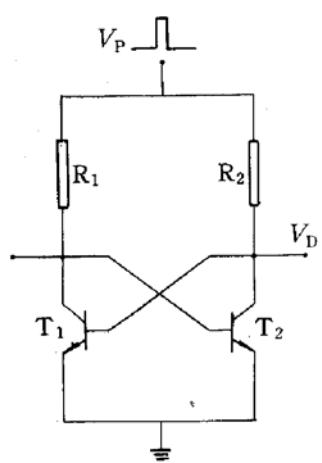


图 1 触发器电路原理图

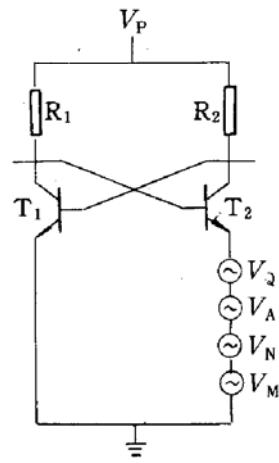


图 2 传感器的等效电路图

在双稳态触发器电路中. 如果上述前两项 V_Q 和 V_A 被完全消除,而且电路中也不存在被测量的敏感信号 V_M ,则触发器由非稳态向稳态的转变仅由噪声信号 V_N 决定,噪声信号对触发器电路的影响是随机的,其分布为正态分布,是对称的. 因此,当多次重复触发器由非稳态向稳态的转变,在噪声信号作用下,输出端出现高电平“1”和低电平“0”的几率是相等的,均为 50%. 如果将被测量的敏感信号 V_M ,不对称地加到触发器电路中的一边或两边,则触发器由非稳态向稳态转变,其输出端出现高电平“1”的几率就不再等于 50%. 敏感信号 V_M 愈强,输出高电平“1”的几率,偏离 50% 就愈大. 触发器型传感器就是基于上述理论分析的基础上而制成的.

3 实验结果

本文以触发器型压力传感器为例,对这类传感器的特性进行了测试. 其基本结构如图 1 示出的双稳态触发器. 制造工艺采用双极集成电路技术和微机械加工技术相结合. 为了提高电路的工作频率,减小寄生参量的影响,尽量减小两个晶体管 T_1 和 T_2 的几何尺寸. 实验采用(100)晶面的硅单晶片,利用各向异性腐蚀将硅片腐蚀成矩形应变膜,膜厚约为 $40\mu\text{m}$. 两个应变电阻 R_1 和 R_2 分别置于 $\langle 110 \rangle$ 和 $\langle 1\bar{1}0 \rangle$ 晶向的应变膜内. 电阻的静态阻值约为 $4\text{k}\Omega$,掺杂浓度约为 $5 \times 10^{18}\text{cm}^{-3}$. 在压力作用下,应变膜发生形变,其中一个电阻的阻值增大,另一个电阻的阻值减小^[2].

传感器的测试电路如图3所示。外接的精密电位器W用于补偿传感器电路不对称所引起的失调电压 V_A 。触发器的一个输出端经过比较器A，放大整形后接一频率计数器F，记录输出高电平的频率 f_H 。在触发器电路中晶体管的集电极上加高频脉冲信号源，脉冲频率为 $f_P = 15.0\text{kHz}$ ，脉冲幅度为1.2伏。在进行测试时，首先利用电位器W调节触发器输出高电平“1”的频率在零点附近，然后对传感器施加压力，随着压力的增加，触发器输出高电平“1”的频率 f_H 逐渐增大，其测试结果如图4所示。图中以传感器所加压力为横坐标，触发器输出高电平“1”的频率 f_H 与脉冲信号源频率 f_P 之比为纵坐标。图4是在不同测试条件下对同一传感器的测试结果。图4(a)示出测试时所加调控三角波电压 V_{CN} 的幅度较小，所测压力量程小；图4(b)示出所加调控三角波电压 V_{CN} 的幅度较大，压力量程大。其原因见后。

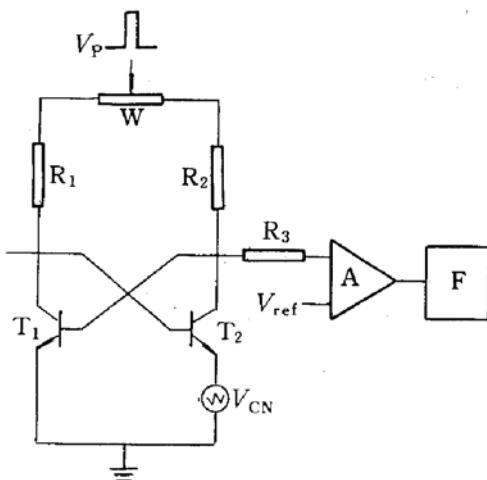


图3 传感器测试电路原理图

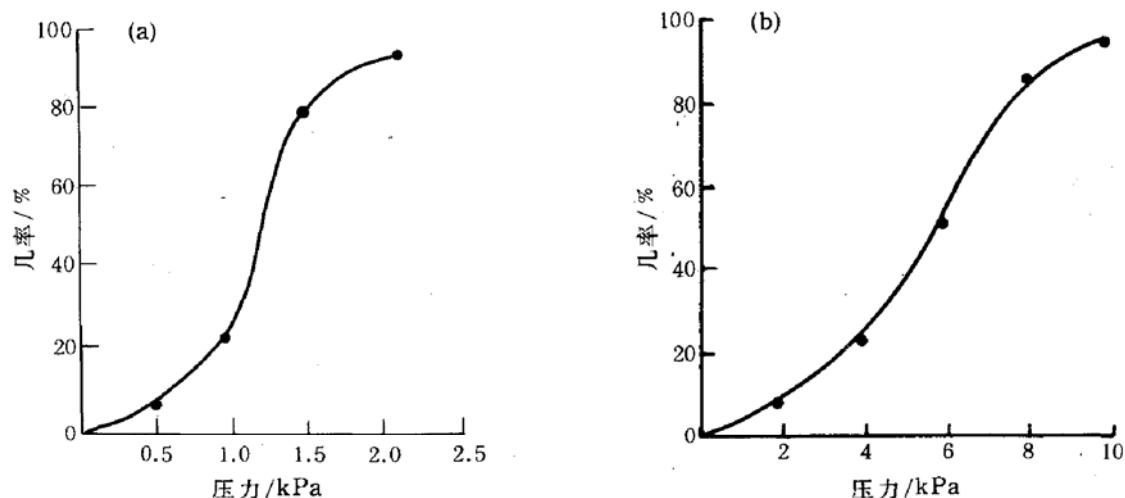


图4 传感器的特性曲线

4 噪声对传感器特性的影响

上述四个因素中，保留电荷和电路元件的不对称可以采用适当方法来消除。因而对触发器输出高电平“1”几率起作用的因素只有敏感信号 V_M 和噪声 V_N 。根据上述分析，当 $V_M + V_N > 0$ 时，触发器输出高电平“1”。反之，当 $V_M + V_N < 0$ 时，触发器输出低电平“0”。在压力量程范围内，力敏电阻的变化是几欧姆，即 V_M 的幅度是几毫伏，而噪声电平 V_N 的均方根值约为100微伏，因 $V_M \gg V_N$ ，所以 $V_M + V_N$ 主要由 V_M 决定。故若 $V_M > 0$ ，触发器输出高电平“1”； $V_M < 0$ ，触发器输出低电平“0”。这样传感器只能测出 V_M 的正负，而不能测出其值的大小，为了测量 V_M 值，必须在 T_2 管发射极对地之间加调控信号 V_{CN} ，它是分布对称的三角波电压。在某一时刻 V_{CN} 值为 V 的几率密度：

$$f(V) = \begin{cases} \frac{1}{V_{\text{CNO}}} & |V| \leq \frac{V_{\text{CNO}}}{2} \\ 0 & |V| > \frac{V_{\text{CNO}}}{2} \end{cases} \quad (1)$$

式中 V_{CNO} 为三角波电压的峰值.

当 $V_M + V_{\text{CN}} + V_N > 0$ 时, 触发器由非稳态转变到稳态, 输出高电平“1”. 当 $V_M + V_{\text{CN}} + V_N < 0$ 时, 触发器输出低电平“0”. 由于 $V_N \ll V_M + V_{\text{CN}}$, 因而 V_N 可以忽略. 触发器输出高电平的几率 P 为

$$P = \int_{-V_M}^{+\infty} f(V) dV = \int_{-V_M}^{V_{\text{CNO}/2}} f(V) dV \quad (2)$$

当

$$V_M > \frac{V_{\text{CNO}}}{2} \text{ 时}, \quad P = 1$$

$$V_M < -\frac{V_{\text{CNO}}}{2} \text{ 时}, \quad P = 0$$

由上式表明, 当 $|V_M| > V_{\text{CNO}/2}$ 时, 传感器已达饱和, 不能检测敏感信号的大小, 只能测量其正负. 当 $|V_M| < V_{\text{CNO}/2}$ 时, 式(2)为

$$\begin{aligned} P &= \int_{-V_M}^{+\infty} f(V) dV = \int_{-V_M}^{V_{\text{CNO}/2}} \frac{1}{V_{\text{CNO}}} dV \\ &= \left(\frac{V_{\text{CNO}}}{2} + V_M \right) \frac{1}{V_{\text{CNO}}} \\ &= 50\% + \frac{V_M}{V_{\text{CNO}}} = 50\% + \frac{V_p}{V_{\text{CNO}}} \times \frac{\Delta R}{R} \end{aligned} \quad (3)$$

式中 V_p 为脉冲电源幅度; R 为不受压力作用时力敏电阻值; ΔR 为压力作用下力敏电阻的阻值差.

根据半导体材料的压阻效应^[2]

$$\frac{\Delta R}{R} = \pi \sigma \quad (4)$$

式中 π 为材料的压阻系数; σ 为应力.

将式(4)代入式(3), 得到触发器输出高电平“1”几率 P 为

$$P = 50\% + \frac{1}{V_{\text{CNO}}} V_p \pi \sigma \quad (5)$$

由上式可以得到几率 P 与应力 σ 的关系, 如图 5 所示. 调控三角波电压相当于一个可控的

“噪声”信号, 可以改善传感器的特性. V_{CNO} 愈大, 传感器测量的线性范围愈大, 灵敏度愈低. 反之亦然. 图 4(a)表示测试时调控三角波电压幅度 V_{CNO} 小于图 4(b)的调控电压幅度 V_{CNO} . 实验结果与理论分析基本一致. 但是, 图 4 曲线与公式(5)并不完全吻合. 其主要差异是实验曲线在压力较低时, 输出几率的变化比较缓慢, 存在一个非线性区. 主要原因是噪声电压 V_N 的作用. 公式(5)是在假设 $V_N \ll V_M + V_{\text{CN}}$, 忽略噪声电压 V_N 的情况下得到的, 在压力较低时, 测量信号电压 V_M 也较低, 故上述假

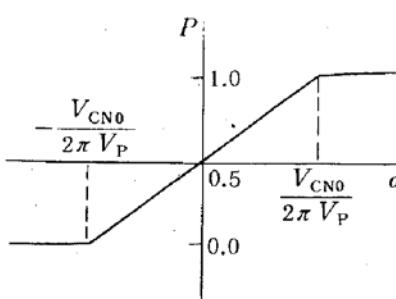


图 5 几率分布曲线

设与实际情况有较大的偏差。另外，如上所述，公式(5)的推导是在假设 $V_N \ll V_{CN0}$ 的条件下得到的，即只考虑三角波电压，忽略了系统固有的噪声电压 V_N 。实际上在测量过程中，是两部分“噪声”电压的叠加($V_{CN} + V_N$)起作用。因此，图 4(a)和(b)的实验曲线与公式(5)的理论分析不完全吻合。

5 结论

新型集成压力传感器——触发器型压力传感器是利用非稳态系统对微小干扰非常敏感的原理而制成的。具有灵敏度高和数字输出的特点。噪声信号对传感器的特性有非常重要的影响。根据噪声作用原理，加入调控三角波电压信号可以改善传感器的特性。传感器的制备采用集成电路工艺和微机械加工技术相结合，便于实现批量生产，具有良好的应用前景。

参 考 文 献

- [1] W. Lian and S. Middelhoek, Sensors and Actuators, 1990, **24**: 65~72.
- [2] 张维新, 朱秀文, 毛赣如, 半导体传感器, 天津大学出版社, 1990 年, 第四章。

Study of Novel Integrated Pressure Sensor

Zhang Weixin, Mao Ganru, Qu Hongwei, Yao Suying and Li Jianwen

(Electronic Engineering Department, Tianjin University, Tianjin 300072)

Received 21 June 1995, revised manuscript received 3 November 1995

Abstract The paper describes a novel integrated pressure sensor. The piezoresistors are integrated with flip-flop circuit. The sensor is fabricated by integrated circuit and micromechanic technique. The principle and circuit structure of the sensor are analysed. The experimental results are discussed. The noise effects on the characteristics of the sensor are analysed in detail. A controllable triangle wave voltage is added in the test circuits, which can improve the characteristics of the sensor.

EEACC: 7230