

## 多晶硅集成高温压力传感器研究

张 威,王阳元

(北京大学微电子学研究院,北京 100871)

**摘 要:** 高温压力传感器因其特殊的应用环境而日益受到人们的重视. 一些特殊的材料如 SiC、SOI 等可以用来制作高温压力传感器,但是由于成本较高或加工难度大等原因,尚未得到广泛应用. 本文提出了一种新型的高温压力传感器,采用多晶硅作为压敏电阻,同时采用新的工艺措施与全耗尽 CMOS 放大电路集成在一起,将输出电压转换为 0 ~ +5V 的输出信号. 通过模拟与投片实验,得到了优化的多晶硅注入浓度,从而使其压阻温度系数在 -40 ~ 180 范围内接近于零.

**关键词:** 集成; CMOS; 多晶硅; 压力传感器

**中图分类号:** TN4 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2003) 11-1736-03

### Research on Poly-Silicon Integrated Pressure Sensor for High Temperature

ZHANG Wei, WANG Yang-yuan

(Institute of Microelectronics, Peking University, Beijing 100871, China)

**Abstract:** Pressure sensor for high temperature is very useful for various area applications. Some special materials such as SiC, SOI can be used to manufacture high temperature pressure sensor, but due to the difficult process or/and cost, they are not used widely. In this paper, a novel poly-silicon pressure sensor is designed, further more a CMOS fully depleted integrated circuit is used to change output signal into 0 ~ +5V industrial signal. After simulation and process experiments, the optimized condition of poly-silicon diffusion concentration was found, and the temperature coefficient is reduced to nearly zero between -40 ~ 180.

**Key words:** integration; CMOS; poly-silicon; pressure sensor

## 1 引言

普通的硅基压阻式的压力传感器具有结构简单,输出为直流电压信号等优点,但由于扩散电阻具有较高的温度漂移,同时压阻系数也随温度变化而变化,所以温度补偿成为压阻式压力计的难题. 本文提出了一种新型高温多晶硅集成压力传感器,采用全耗尽 CMOS 电路的多晶硅层作为压敏电阻,利用多晶硅的压阻系数具有低温漂移的特点,大大地改善了压力传感器的温度特性. 同时通过全耗尽 CMOS 电路对电桥信号进行放大输出,使输出信号变为工控通用的 0 ~ 5V,减少了传感器后续放大调理电路,方便了用户使用.

## 2 多晶硅压敏电阻的设计

多晶硅常用在 CMOS 电路中作为栅电极. 由于它的电阻温度系数取决于掺杂浓度,可为正或负型,容易实现零点漂移的温度补偿. 因此我们同时可将其作为压敏电阻,由于多晶硅是淀积在二氧化硅绝缘体上,没有体硅压阻的 P-N 结的反向漏电流,因此能工作在更高的温度范围<sup>[2]</sup>. 多晶硅的电阻率可以看作晶粒区和势垒区的串联平均电阻率<sup>[1~4]</sup>.

$$R = \frac{L - 2W}{L} R_g + \frac{2W}{L} R_b \quad (1)$$

$R_g$ ,  $R_b$  分别为晶粒区和势垒区的电阻率;  $W$ ,  $L$  分别为多晶硅电阻的宽和长.

平面应力场中多晶硅薄膜电阻器的综合平均压阻效应和单晶硅一样,表达式为:

$$\bar{R} = R_0 (1 + \lambda \epsilon) \quad (2)$$

其中  $\bar{R}$  和  $\bar{\epsilon}$  是沿电流方向的电阻率及其变化量. 每个晶粒的压阻效应如下式:

$$\frac{\bar{R}}{R_0} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left( 1 + \frac{\epsilon_i}{2} \right) \quad (3)$$

通过理论计算可以得到多晶硅的平均压阻系数<sup>[2~4]</sup>:

$$\bar{\epsilon} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left[ \frac{1 + \frac{\epsilon_i}{2} \left( 1 - \frac{2W}{L} \right)}{2} \right] \quad (4)$$

$N$  为晶粒个数. 考虑叠加效应后最终得到的表达式为<sup>[2~4]</sup>:

$$\bar{\epsilon} = \frac{19}{60} \left( \frac{1}{44} + \frac{1}{12} + \frac{41}{19} \right) \left[ \frac{1 + \frac{\epsilon}{2} \left( 1 - \frac{2W}{L} \right)}{2} \right] \quad (5)$$

$$\bar{\epsilon} = -\frac{1}{12} \left( \frac{1}{44} - \frac{1}{11} - \frac{1}{12} \right) \left[ \frac{1 + \frac{\epsilon}{2} \left( 1 - \frac{2W}{L} \right)}{2} \right] \quad (6)$$

多晶硅压敏电阻采用 LPCVD 电极来实现. 由于扩散不能保证掺杂的均匀性和可重复性, 因此传感器用多晶硅薄膜多数采用离子注入工艺. 掺杂元素首选硼, 原因是对于 N 型的衬底, 磷、砷会导致晶粒间界的分凝. 与单晶硅一样, 多晶硅离子注入也会产生晶格损伤. 所以多晶硅薄膜在离子注入之后也需要进行退火. 退火的目的有两个: (1) 通过加大多晶硅晶粒尺寸使得多晶硅材料更加稳定; (2) 消除离子注入所产生晶格损伤并且激活掺杂剂. 由于退火能够加速掺杂原子在晶粒间界中的扩散, 即使退火时间很短也会使得掺杂原子在薄膜中均匀分布. 我们选择炉退火工艺, 它保证了薄膜特性的高度一致, 并且十分容易实现. 经过多次计算和实验验证后, 我们

最终确定压敏多晶硅的制作条件为 620 °C LPCVD 5000 Å 注入剂量 3E15, 在氮气环境下退火 30 分钟.

### 3 传感器结构设计

压力传感器的结构称之为硅杯. 常用的硅杯的结构主要有以下几种: C 型硅杯、E 型硅杯和双岛式硅杯. 合理的硅杯设计可保证压力引起的应变最大限度的传递到多晶硅电阻上, 从而引起最大的压阻效应, 获得最大的输出信号. 为了解各种硅杯在压力作用下的压力—应变传递情况, 使用 ANSYS 公司的有限元分析软件对各种硅杯的受力进行分析.

图 1~图 3 分别为三种硅杯的 ANSYS 模拟结果.

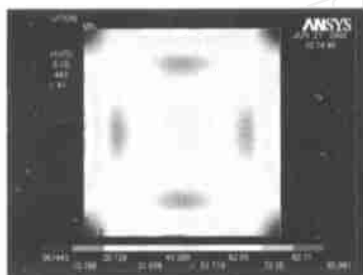


图 1 C 型硅杯的应力分布

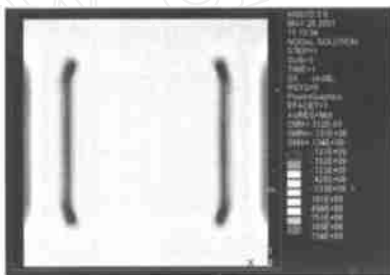


图 2 E 型硅杯的应力分布

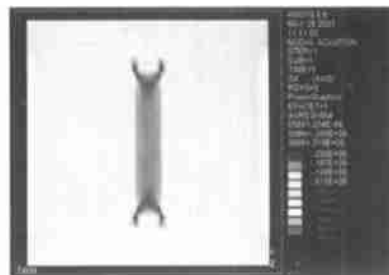


图 3 双岛硅杯的应力分布图

通过对几种硅杯进行优化后, 我们发现由于双岛的应力集中效应, 使膜片中心和两边的 X 方向应力大大增强, 十分适于多晶硅电阻的布置. 另外双岛的应力集中效应使得应力变化更为平坦, 对于消除工艺误差所带来的应力大小变化, 改善信号线性度有很大的帮助. 故最终采用了双岛式硅杯结构.

### 4 电路部分的设计

电路由两部分组成: 恒流源和前置放大器. 在电流源中, 通过调节  $R_1$  和  $R_2$  的比例大小, 设定基准电压, 同时通过调节  $R_f$  的大小, 来调节供电电流. 电流的大小

$$I = (U_+ - U_-) \frac{R_2}{(R_1 + R_2) R_f} \quad (7)$$

前置放大采用同相并联差动放大. 此电路具有高共模抑制比, 低温漂等特点. 运放采用级联对称全耗尽 CMOS 运放, 此运放具有高的增益及共模抑制比. 并且因为采用全耗尽 CMOS 电路, 抑制了高温条件下器件泄漏电流的增加, 可以有效降低功耗. 同时全耗尽 CMOS 器件具有高温环境下阈值电压变化小的优点, 改善了器件的退化特性, 可以使电路在高温下稳定、正常工作.

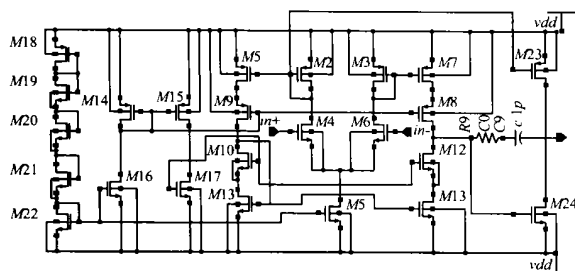


图 4 级联对称 CMOS 运放电路图

此运放具有 80dB 的低频增益, 及 80dB 的共模抑制比<sup>[2]</sup>.

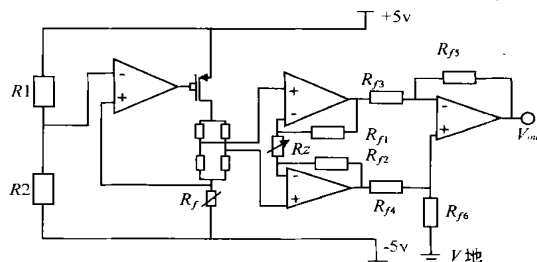


图 5 集成化压力传感器电路

当  $R_{f1} = R_{f2}$ ,  $R_{f3} = R_{f4}$ ,  $R_{f5} = R_{f6}$  此放大器的最终输出为:

$$U_{out} = \frac{R_{f5}}{R_{f3}} \left( 1 + \frac{R_{f1}}{R_{f2}} \right) (U_{i2} - U_{i1}) \quad (8)$$

下图为 -40 °C 与 180 °C 下的放大器模拟输出曲线:

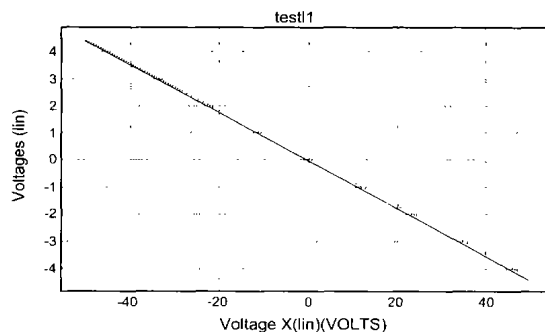


图 6 放大器温漂曲线

从图 6 可以看出放大器随温度变化很小, 仅为 0.45% / °C.

在 25 °C 放大器的频率特性模拟如下:

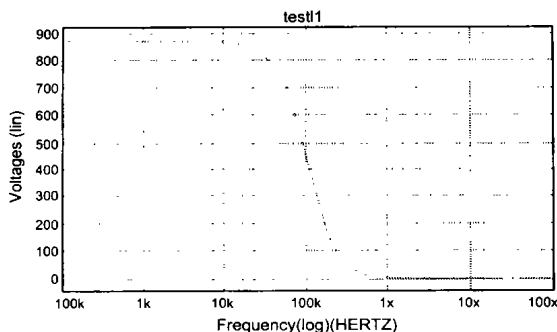


图 7 25 放大器的频率特性

## 5 集成化制造工艺

在制造集成化的压力传感器的时候,电路采用 P 阱全耗尽 CMOS 工艺,压力传感器部分采用 MEMS 中的体硅工艺.考虑到两者工艺的兼容性,我们调节了工艺流程及工艺条件.我们使用低阻硅作衬底,先采用 CMOS 工艺,先后形成 P 阱、有源区、场氧,在淀积多晶硅后,由于栅与压敏电阻多晶硅在电学性能上要求不同,我们多加了一层掩膜版,将多晶硅压敏电

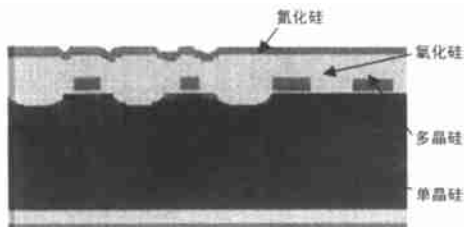


图 8 背腔腐蚀前双面淀积氮化硅保护

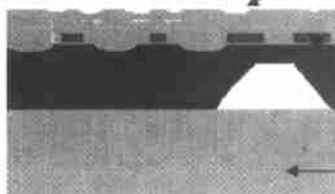


图 9 硅-玻璃键和示意图

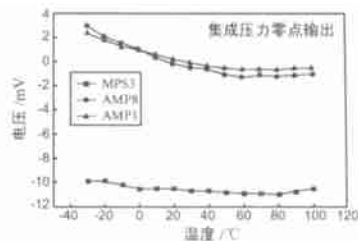


图 10 零点温漂测试曲线

图中给出了三只样品的测试曲线.其中 AMP1 和 AMP8 的零点基准为 0mV, MPS3 的零点基准是 -10mV.由图中曲线可以看出,此种集成高温压力传感器的零点漂移在 -30 ~ 100 范围内不超过 4mV.零点温漂表达式为:

$$= \frac{Y_{0(T2)} - Y_{0(T1)}}{Y_{FS(T1)} (T2 - T1)} \times 100\%$$

式中,  $Y_{0(T1)}$ :  $T1$  温度下,平均零点输出值;  $Y_{0(T2)}$ :  $T2$  温度下,平均零点输出值;  $Y_{FS(T1)}$ : 满量程输出值.

带入数值后计算出传感器的零点温漂为:

$$= \frac{4}{5 \times 10^3 \times 130} \times 100\% = 0.000615\%$$

由计算结果可以看出,此种集成压力传感器的零点温漂远远低于普通的压力传感器.同时实验结果也验证了设计的正确性.

## 参考文献:

- [1] 王阳元, T I 卡明斯, 赵宝瑛. 多晶硅薄膜及其在集成电路中的应用[M]. 北京: 科学出版社, 2001.

阻的掺杂浓度调节为  $10^{19} - 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ . 另外体硅工艺中采用的 KOH 腐蚀与 IC 工艺不兼容, 钾离子将严重损害 CMOS 电路的性能, 故在背腔腐蚀时, 应注意正面的电路保护, 同时应注意调整工艺步骤, 在合适的步骤进行背腔腐蚀. 若先进行背腔腐蚀, 则在以后 CMOS 工艺中的扩散、氧化、淀积过程中的许多高温过程, 会对压力敏感膜造成损伤, 从而影响压力传感器的精度及稳定性. 因此, 我们选择在 P, N 管源漏形成之后, 进行二氧化硅和氮化硅的淀积. 由于氮化硅对钾离子具有较好的阻挡作用<sup>[5]</sup>, 我们将其作为正面电路及背面腐蚀的保护层. 如图 8、9 所示.

在溅射并刻蚀完铝之后进行硅-玻璃键合. 铝同时还可作为导线将各部位等电位, 从而避免了键合过程中所施加的高电压对器件的损害. 此后再经过低温淀积二氧化硅钝化、刻孔、划片等工艺步骤. 最终完成集成化的压力传感器的制造.

## 6 实验结果及分析

我们对加工完成的集成高温压力传感器进行了性能实验. 由于条件所限, 只对传感器的零点温漂进行了测试, 温度范围为 -30 ~ 100, 测试结果见图 10.

- [2] 孙以材, 刘玉岭, 孟庆浩. 压力传感器的设计制造与应用[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2000.
- [3] Obermeier E, et al. Polysilicon is a material for microsensor applications[J]. Sensors and actuators, 1992, 30(8): 149 - 155.
- [4] 王善慈. 多晶硅敏感技术[J]. 传感器技术, 1994, 13(4): 56 - 64.
- [5] Kenneth R Laker, Willy M C Sansen. Design of Analog Integrated Circuits and Systems [M]. USA, McGraw-hill Science Engineer/ Math, 1994, 583 - 584.
- [6] 钱静波, 李丹. 硅应变计的氮化硅钝化新技术[J]. 传感器技术, 2000, 19(6): 40 - 41.
- [7] 载风. 能在高温下测量的 SOI 型压力传感器[J]. 现代计量测试, 1994, 1(2): 47 - 48.
- [8] 彭军. SiC 材料与器件[J]. 半导体技术, 1995, 10(5): 33 - 40.

## 作者简介:

张 威 男, 1967 年 7 月生于黑龙江哈尔滨, 博士, 北京大学微电子学研究院, 讲师, 主要研究方向为 MEMS 器件及加工工艺.

王阳元 男, 1935 年 1 月生于浙江省宁波, 中科院院士, 博士生导师, 北京大学微电子学研究院院长, 共发表著作和译著五部, 论文 130 余篇.