

集成 MOS 力敏运放压力传感器

岳瑞峰 刘理天 李志坚

(清华大学微电子学研究所, 北京 100084)

摘要: 设计并制作出一种新型集成压力传感器——集成 MOS 力敏运放压力传感器。它将运算放大器中的一对 PMOS 差分输入管集中设置在 N 型 (100) Si 膜片上的最大应力区, 并使它们的沟道方向相互垂直, 运放中其它元件全部集中设置在厚体硅上的低应力区。在压力作用下, 输入级 MOS 管沟道中载流子迁移率发生变化, 运算放大器以其为输入信号而产生力敏输出。这种压力传感器具有很高的压力响应灵敏度, 可望在诸多领域有广泛应用。

关键词: 集成压力传感器; 力敏运算放大器; 压阻效应

EEACC: 7230; 7320V; 1220; 2560R

中图分类号: TP212.1 文献标识码: A 文章编号: 0253-4177(2001)04-0500-03

直, 将其栅极间短路并接地, 即:

$$V_{G1} = V_{G2} = V_G = 0 \quad (1)$$

$$I_0 = I_{D1} + I_{D2} \quad (2)$$

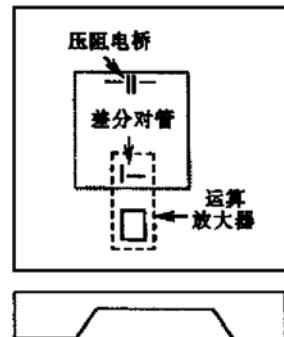


图 1 压力传感器结构示意图

FIG. 1 Schematic Diagram of Integrated Pressure Sensor Structure

当在硅膜片上的压力为零时, MOS 管沟道迁移率相等, 即:

$$\mu_1 = \mu_2 = \mu \quad (3)$$

则:

$$I_{D1} = I_{D2} = \frac{\mu C_{ox} W}{2L} (V_{GS} - V_T)^2 \quad (4)$$

当在硅膜片上施加一定压力时, 由于这对 PMOS 管的沟道方向相互垂直, 它们分别受到横向和纵向应力的作用, 沟道迁移率将同时发生向相反

2 工作原理

集成 MOS 力敏运放压力传感器的实质是一种以力敏晶体管作为输入对管的 MOS 运算放大器。它将运算放大器的一对差分输入管集中设置在 N 型 (100) 硅膜片上的最大应力区, 如图 1 所示。

图 2 为该传感器的差分输入对管。其中 M1 和 M2 是完全对称 (匹配) 的, 但两者沟道方向相互垂

岳瑞峰 男, 1965 年出生, 副研究员, 主要从事微电子机械系统技术、微型传感器以及表面与界面物理研究。

2000-05-15 收到

©2001 中国电子学会

方向的变化(即一个增加,一个减少):

$$\mu^1 = \mu + \Delta\mu_1 \quad (5)$$

$$\mu_2 = \mu - \Delta\mu_2 \quad (6)$$

其中 $\Delta\mu_1, \Delta\mu_2 \geq 0$, 由此给出输出电流差值 ΔI_D 为:

$$\begin{aligned}\Delta I_D &= I_{D1} - I_{D2} = \frac{\mu_1 C_{ox} W}{2L} (V_{GS} - V_T)^2 \\ &\quad - \frac{\mu_2 C_{ox} W}{2L} (V_{GS} - V_T)^2 \\ &= \frac{(\Delta\mu_1 + \Delta\mu_2)}{2\mu_0} I_0 \quad (7)\end{aligned}$$

从上式可以看出, $\Delta\mu_1 + \Delta\mu_2$ 的作用与普通差分对管的输入差值电压 V_{ID} 的作用相同, 可视为 PMOS 力敏的输入信号。如果在 M1 和 M2 的漏级分别接上不受应力影响的 MOS 管有源负载后, 即构成力敏差分放大器。它将电流输出转换成电压输出, 从而实现电压放大, 这样通过测量输出电压, 就可求出压力值。

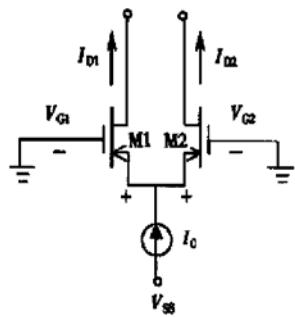


图 2 PMOS 力敏差分对管

FIG. 2 PMOS Stress-Sensitive Differential Input Pair

MOS差分放大器一般存在电压增益低,输出阻抗大,驱动负载能力弱,不能实现零输入时零输出等缺点,因此不能满足实用要求.如果使其成为运算放大器的输入级,则上述问题就迎刃而解了.

我们的设计思想是，除一对 PMOS 力敏输入管外，运算放大器中其它元件全部集中设置在厚体硅上的低应力区，这些元件可以是 NMOS、PMOS 和（或）双极型晶体管。整个运放采用开环或闭环工作模式，放大倍数可为几十至几千倍，采用 MOS 或 BiMOS 工艺实现力敏元件和放大电路的单片集成。考虑到实际运算放大器必然存在失调电压，可以采用在输入端调零的方法很容易解决这个问题。

3 电路设计和模拟结果

考虑到实际需要和力敏运算放大器主要是开环工作,对设计的运放放大倍数要求并不高,几十至一千倍左右即可。为了便于制造,我们采用的是一种普通E/E PMOS运放电路,它由26个MOS管和一个反馈电容组成,如图3所示。经过Pspice软件模拟,设计制作的运算放大器的开环增益为60.8dB,静态功耗为4.91mW。在假设PMOS输入差分对管的沟道迁移率分别增大和减小6%的条件下,用Pspice软件对运算放大器进行了模拟,结果表明输出电压为2.14V。

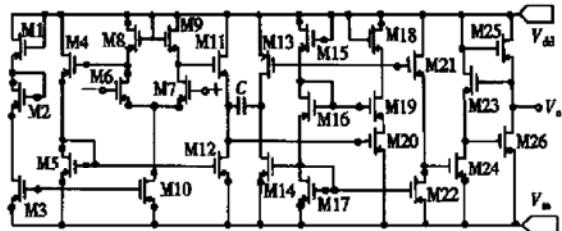


图 3 E/E PMOS 运算放大器电路

FIG. 3 Circuit Configuration of E/E PMOS Operational Amplifier

4 压力传感器的结构和制作工艺

设计的压力传感器采用 C 型硅杯结构, 芯片尺寸为 $5\text{mm} \times 5\text{mm}$, 膜片尺寸为 $2\text{mm} \times 2\text{mm} \times 20\mu\text{m}$. 根据有限元法分析硅杯结构的应力分布, 将 PMOS 差分输入管集中设置在 N 型(100)Si 膜片上的最大应力区, 并使它们的沟道方向分别沿 [011] 和 $\bar{[011]}$ 方向; 运放中其它元件全部集中设置在距离膜片 $200\mu\text{m}$ 以外的厚体硅区, 该处的应力已可以忽略不计, 如图 3 所示. 另外, 在同一膜片上的最大应力区还制作了四个阻值均为 $2\text{k}\Omega$ 的注入电阻, 它们组成惠斯登压阻电桥. 在制作过程中, 先采用 $5\mu\text{m}$ 硅栅等平面 PMOS 工艺在芯片正面制作出电路, 对其进行保护处理后, 用 KOH 溶液腐蚀芯片背面形成硅杯结构.

5 实验结果

图4给出了力敏运算放大器压力响应的测试结果。作为比较,图5给出了惠斯登压阻电桥的压力响应。

应测试结果。由此可见,我们提出的集成 MOS 力敏运放压力传感器不仅具有很高的压力响应灵敏度,而且具有良好的线性度。

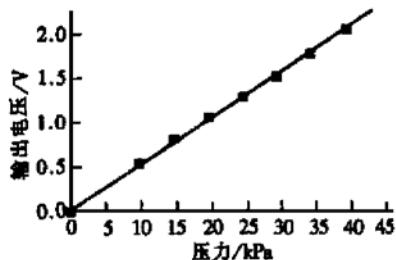


图 4 力敏运算放大器的压力响应

FIG. 4 Pressure Response of Stress-Sensitive Operational Amplifier

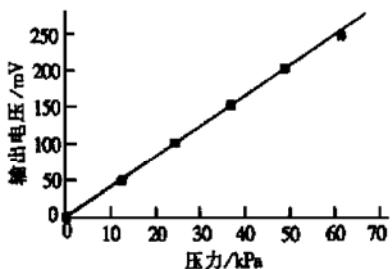


图 5 惠斯登电桥的压力响应

FIG. 5 Pressure Response of Wheatston-Bridge

6 结论

本文提出的集成 MOS 力敏运放压力传感器具

有下列优点:(1)结构简单,原理明确,实现了力敏元件与信号处理电路的单片集成,具有很高的压力响应灵敏度和良好的线性度。(2)能大大简化调零步骤,明显降低系统温漂和功耗,成本低廉,适于批量生产。目前的集成压力传感器主要是由力敏元件和放大处理电路组成,后者本身通常就包含几个运放,只有对所有力敏元件和运放调零后才能使压力传感器正常工作。不仅力敏元件有零点漂移、温漂,运放也同样有零点漂移、温漂,这无疑会使零点漂移和温漂问题变得复杂化。如果采用力敏运放,在其输入端只需调零一次即可,操作非常灵活方便。由于它包含的元件数最少且无电阻制作工艺,因此能明显提高成品率和降低生产成本,实现低功耗。

参考文献

- [1] R. F. Wolfenbuttel, Silicon Sensors and Circuits: On-Chip Compatibility, Chapman & Hall, London, 1996.
- [2] LIU Junhua, Intelligent Sensor Systems, Xidian University Press, P. R. China, 1999(in Chinese).
- [3] R. Schorner, M. Poppinger and J. Eibl, Sensors and Actuators (A), 1990, **21**—**23**: 73—78.
- [4] ZHANG Weixin, MAO Ganru, QU Hongwei et al., Chinese Journal of Semiconductors, 1996, **17**(6): 435—439 (in Chinese).
- [5] M. -T. Chau, D. Dominguez, B. Bonvalot and J. Suski, Sensors and Actuators (A), 1997, **60**: 86—89.

Integrated Pressure Sensor with Stress-Sensitive MOS Operational Amplifier

YUE Rui-feng, LIU Li-tian and LI Zhi-jian

(Institute of Microelectronics, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: A new type of integrated pressure sensor with stress-sensitive MOS operational amplifier has been designed and fabricated. Differential input pair of the MOS operational amplifier is located in the maximum stress region of N-type (100)-oriented silicon membrane, whose channels are perpendicular to each other, while other parts of the amplifier are designed on the low stress region of the bulk part of a chip. When pressure is increased, the change in mobility of carriers in the channel acts as the input signals of amplifier, thus leading to the pressure-related output. This sensor is of very high sensitivity and expected to be widely applied in many fields.

Key words: integrated pressure sensor; stress-sensitive operational amplifier; piezoresistive effect

EEACC: 7230; 7320V; 1220; 2560R

Article ID: 0253-4177(2001)04-0500-03

YUE Rui-feng male, born in 1965, associate professor, is devoted to the research on MEMS, microsensors, surface and interface physics.

Received 15 May 2000

© 2001 The Chinese Institute of Electronics