

MOS 力敏运算放大器

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: 利用 MOSFET 的压阻效应,本文提出了力敏运算放大器的概念、基本原理和设计思想. 作为其应用之一,研制出一种新型集成压力传感器——集成 MOS 力敏运放压力传感器. 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: 力敏运算放大器; 压阻效应; 集成压力传感器

中图分类号: TP212.12; TN722.7+7 文献标识码: A 文章编号: 0372-2112 (2001) 08-1032-03

Stress-Sensitive MOS Operational amplifier

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

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

Abstract: The concept, fundamental and design methodology of stress-sensitive operational amplifier are proposed on the basis of piezoresistive effect of MOS field-effect transistor. As one of its applications, a novel integrated pressure sensor with stress-sensitive MOS operational amplifier is designed and fabricated. This kind of pressure sensor is of very high pressure sensitivity and promising to achieve widespread application in many fields.

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

1 引言

在模拟集成电路中,运算放大器是最常用的基本单元,它能用来处理各种模拟信号,完成放大、振荡、调制和解调、模拟信号的加、减、乘、除和比较等功能. 由于力学量敏感元件的输出信号一般都很小,必须经过处理电路放大变换才能满足应用的要求,所以实现敏感元件与信号处理电路一体化(即单片集成)直至智能化是传感器的一个主要发展方向^[1,2]. 当前,集成传感器的发展已显示出这样一种趋势,即将敏感元件作为处理电路的一部分,使敏感元件既起着探测信号的作用,作为处理电路中的元件又起着相应的电路功能的作用^[3-5]. 这种趋势使敏感元件与处理电路的联系越来越紧密,给集成传感器的设计带来了极大的灵活性,有可能使电路大为简化. 为此,本文利用 MOSFET 的压阻效应提出了力敏运算放大器的设想,并将其应用于压力检测中,研制出了高灵敏度集成 MOS 力敏运放压力传感器.

2 工作原理

根据压阻效应,在应力作用下,硅材料的电阻率和载流子迁移率将会发生变化. 电阻的相对变化量与应力有如下关系:

$$R/R = \epsilon_{11} + \epsilon_{22} \quad (1)$$

式中 ϵ_{11} , ϵ_{22} 分别为纵向和横向应力, ϵ_{11} 是指电流方向与应力方向一致情况下的纵向压阻系数, ϵ_{22} 是指电流方向与应力方

向垂直情况下的横向压阻系数. 由于 MOSFET 的漏电流 I_D 与载流子迁移率 μ 成正比,则:

$$I_D/I_D = \mu/\mu = R/R \quad (2)$$

这里 R 为反型层沟道电阻. 由式(1)则同样有:

$$I_D/I_D = \epsilon_{11} + \epsilon_{22} \quad (3)$$

由文献[3]可知, MOSFET 的漏电流相对变化率与应变为线性关系,其随晶面、晶向和沟道导电类型的不同而有显著差异,在有些情况下,受张应力和压应力时的压阻系数也有明显不同; P 沟器件压阻特性明显

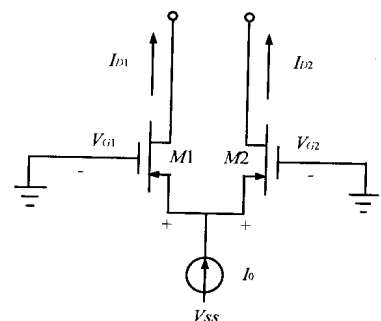


图 1 PMOS 力敏差分对管

好于 N 沟器件,并且在(100)面上,沟道沿 $[0\bar{1}1]$ 方向时压阻效应显著; N 沟器件的压阻系数与栅压关系密切,而 P 沟器件的压阻系数几乎不受栅压影响. 因此,在(100)面上沿 $[0\bar{1}1]$ 方向的 PMOSFET 最适于作为压阻力敏元件.

现在考察图 1 所示 PMOS 差分输入对管 $M1$ 和 $M2$. 如果采用将其栅级间短路并接地,则:

$$V_{G1} = V_{G2} = V_G = 0 \quad (4)$$

$$I_0 = I_{D1} + I_{D2} \quad (5)$$

当受到应力为零时, PMOS 差分输入对管的沟道迁移率相等, 即:

$$\mu_1 = \mu_2 = \mu \quad (6)$$

则:
$$I_{D1} = I_{D2} = \frac{\mu C_{ox} W}{2L} (V_{GS} - V_T)^2 \quad (7)$$

当受到应力不为零时, 如果通过合理设置 PMOS 差分输入对管的方位, 使二者的沟道迁移率同时发生向相反方向的变化(即一个增加, 一个减少):

$$\mu_1 = \mu + \mu_1 \quad (8)$$

$$\mu_2 = \mu - \mu_2 \quad (9)$$

其中 μ_1 、 $\mu_2 \geq 0$, 由此给出输出电流差值 I_D 为:

$$\begin{aligned} I_D = I_{D1} - I_{D2} &= \frac{\mu_1 C_{ox} W}{2L} (V_{GS} - V_T)^2 - \frac{\mu_2 C_{ox} W}{2L} (V_{GS} - V_T)^2 \\ &= \frac{(\mu_1 + \mu_2)}{2\mu} I_0 \end{aligned} \quad (10)$$

从上式可以看出, $\mu_1 + \mu_2$ 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 差分输入对管的输入信号。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, 就可求出应力值。

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。

我们对 MOS 力敏运算放大器的设计思想是, 将一对 PMOS 力敏差分输入管作为传感器的敏感元件设置在最高应力区, 并且在应力作用下使二者的沟道迁移率同时发生向相反方向的变化; 运算放大器中其它元件全部集中设置在无(或低)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~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。由于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。

考虑到实际需要和力敏运算放大器主要是开环工作, 对设计的运放的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, 我们设计了一种普通 E/E PMOS 运放电路, 它由 26 个 MOS 管和一个反馈电容组成。经过 Pspice 软件模拟, 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。

3 集成 MOS 力敏运放压力传感器

作为力敏运算放大器的应用之一, 我们研制成功了集成 MOS 力敏运放压力传感器, 如图 2 所示。该压力传感器采用 C

型硅杯结构, 芯片尺寸为 5mm × 5mm, 膜片尺寸为 2mm × 2mm × 20μm。根据有限元法分析硅杯结构的应力分布, 将 PMOS 差分输入对管集中设置在 N 型(100) Si 上的最大应力区, 并使它们的沟道方向分别沿 $[0\ 1\ 1]$ 和 $[0\ \bar{1}\ 1]$ 方向; 运放中其它元件全部集中设置在距离膜片 200μm 以外的厚体硅区, 该处的应力已可以忽略不计。在制作过程中, 先采用 5μm 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。图 3 为制造的 MOS 力敏运算放大器的扫描电子显微镜 (SEM) 照片。

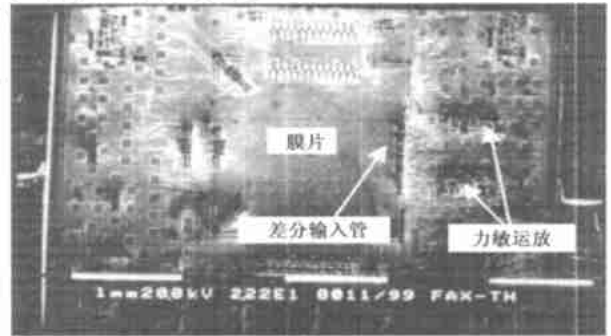


图 2 集成 MOS 力敏运放压力传感器的 SEM 像

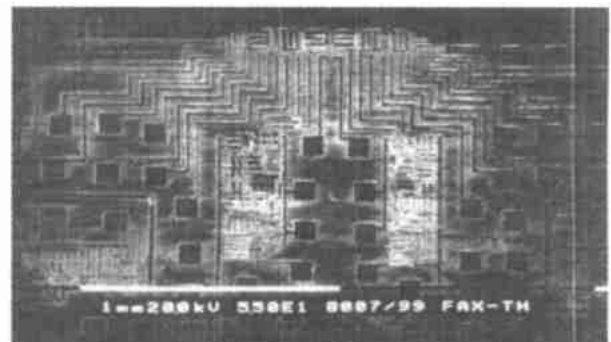


图 3 MOS 力敏运算放大器的 SEM 像

由图 4 可见, 我们研制的集成 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。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

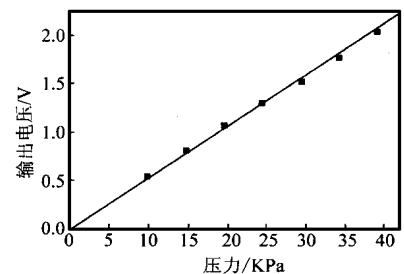


图 4 集成 MOS 力敏运放压力传感器的压力响应

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。另外, 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。

4 结论

本文提出的 MOS 力敏运算放大器结构简单、原理明确, 研制出的集成 MOS 力敏运放压力传感器实现了力敏元件与信号处理电路的单片集成, 功耗低并具有很高的压力响应灵敏度. 对于利用硅压阻效应进行工作的压力、加速度、扭矩、流量、荷载等力学量传感器, 如果将 MOS 力敏运算放大器用于应力检测和信号放大, 可望研制出低功耗、高灵敏度的单片集成传感器.

参考文献:

- [1] Wölfenbittel R F. Silicon Sensors and Circuits: On-chip Compatibility [M]. London: Chapman & Hall, 1996.
- [2] 刘君华. 智能传感器系统 [M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 1999.
- [3] Neumeister J, Schuster G, Munch W V. A silicon pressure sensor using ring oscillators [J]. Sensor and Actuators. 1985, 7: 167 - 176.
- [4] Schorner R, Poppinger M, Eibl J. Silicon pressure sensor with frequency output [J]. Sensors and Actuators A. 1990, 21 - 23: 73 - 78.
- [5] Middelhoek S, French P J, Huijsong J H, Lian W J. Sensors with digital or frequency output [A]. Proc. 4th Int. Conf. Solid-State sensors and Actuators [C]. Tokyo, Japan, 1987: 17 - 24.

- [6] Chau M-T, Dominguez D, Bonvalot B, Suski J. CMOS fully digital integrated pressure sensors [J]. Sensors and Actuators A. 1997, 60: 86 - 89.

作者简介:



岳瑞峰 男. 副研究员. 清华大学微电子学研究所器件物理研究室副主任. 1997 年获西安交通大学博士学位. 随后两年在清华大学微电子学研究所进行博士后研究工作. 主要从事微电子机械系统技术、微型传感器、薄膜物性以及表面与界面物理研究.



刘理天 男. 教授, 博士生导师. 清华大学微电子学研究所器件物理研究室主任. 1970 年毕业于清华大学无线电系并留校任教. 一直从事半导体器件、集成电路和微电子机械系统及传感器的研究. 参加和承担了多项国家重点攻关和科研任务.

李志坚 男. 教授, 博士生导师, 中科院院士. 1951 年毕业于浙江大学物理系, 1958 年获苏联科学副博士学位. 现为中国电子学会副理事长、会士, 长期从事半导体器件物理和微电子技术的研究.