

MOS 场效应管压力微传感器

颜黄苹, 冯勇建, 许金海, 卞剑涛

(厦门大学 机电工程系, 福建 厦门 361005)

摘要: 阐述了一种 MOS 场效应管(MOSFET) 压力微传感器的结构和基本工作原理。通过对该传感器的仿真实验, 证明了 MOSFET 压力微传感器可通过简单的电压——电流转换原理, 利用栅极电容的变化导致漏极电流与开启电压的变化而有效地测出作用于栅极膜片的压力的变化, 具有较高的灵敏度与稳定性。

关键词: 微传感器; MOS 场效应管; 压力测量

中图分类号: TP212

文献标识码: A

文章编号: 1000-9787(2001)05-0019-03

MOS field effect transistor pressure microsensor

YAN Huang-ping, FENG Yong-jian, XU Jin-hai, BIAN Jian-tao

(Dept. of Mech. and Elec. Engin., Xiamen University, Xiamen 361005, China)

Abstract: The structure and basic working principle of a type of MOS field effect transistor pressure microsensor are presented. On the basis of simulation experiment, it proves that this microsensor can make use of the change of gate capacitance which leads to the change of drain current and threshold voltage to measure the change of pressure on the gate diaphragm effectively. This type of microsensor possesses higher sensitivity and higher stability.

Key words: microsensor; MOSFET; pressure measurement

0 引言

随着微电子技术的发展, 微型传感器也随之迅速发展。其中, 硅压力微传感器被广泛应用于医疗、工业过程监控、生物和航空等各个领域。在众多的硅压力微传感器中, 电容式压力微传感器因其具有更高的灵敏度、稳定性、预热时间较短和封装过程中不易受损等优点, 在最近几年中引起了人们更高的重视。但是, 在电容式压力微传感器的制作中, 其信号处理电路非常复杂并且难以测量微小的电容变化。而集成了信号变换装置的硅电容式压力微传感器, 即 MOS 场效应管压力微传感器却很好地克服了电容式压力微传感器的电容难以测量的缺点。

MOS 场效应管压力微传感器具有如下优点: 尺寸小(整个芯片尺寸为 $600\ \mu\text{m} \times 1050\ \mu\text{m}$, 栅极膜片尺寸为 $200\ \mu\text{m} \times 200\ \mu\text{m}$, 其成品外形尺寸约为 $10\ \text{mm} \times 5\ \text{mm} \times 3\ \text{mm}$); 对晶片进行单面加工, 与

MOS 集成电路工艺兼容; 传感器与信号处理电路集成在同一硅芯片上, 通过简单的电压—电流转换原理, 利用漏极电流与开启电压的变化测出压力的变化; 低功耗, 低成本。MOS 场效应管压力微传感器可广泛应用于医疗仪器、压力开关、调节器以及工业控制等领域。

1 MOS 场效应管压力微传感器的结构

MOS 场效应管压力微传感器的结构如图 1 所示。

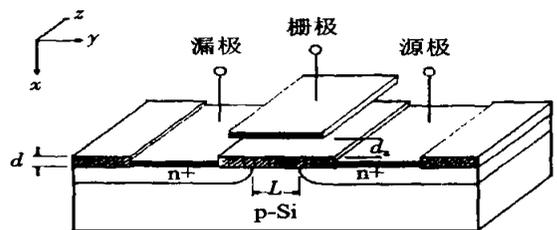


图 1 MOS 场效应管压力微传感器的结构
Fig. 1 Structure of MOSFET pressure microsensor

传感器的信号变换装置正是采用了金属—氧化物—半导体场效应管(MOSFET)的固有电容特性。

MOSFET 以 P 型硅为衬底, 利用掩蔽扩散工艺, 在硅表面做成两个高掺杂的 n^+ 型扩散区, 分别称“源”扩散区和“漏”扩散区。两个扩散区之间的硅表面上有一层薄氧化膜。在这层薄氧化膜的上面, 用蒸发和光刻工艺做成一个铝电极。这个铝电极覆盖在源扩散区和漏扩散区之间的氧化膜上面, 叫做栅极(用 G 表示)。把源扩散区和漏扩散区做上欧姆接触, 并引出电极引线, 分别叫做源极(用 S 表示)和漏极(用 D 表示)^[1]。

栅极与氧化物层之间有一个空气间隙(约为 0.5 μm)。栅极夹在两个 PECVD 制作的 Si_3N_4 的小型薄膜绝缘层(化学薄膜)之间, 形成一个可动的膜片。当压力施加于膜片时, 膜片发生变形, 并引起栅极电容的变化, 而漏极电流和开启电压也将发生变化。

2 MOS 场效应管压力微传感器的基本工作原理^[2,3]

对于 MOSFET, 在线性区域中, 漏电流 I_D 的计算公式为

$$I_D = \mu C_{ao}(W/L)[(V_G - V_T)V_D - \frac{1}{2}V_D^2], \quad (1)$$

式中 $C_{ao} = \frac{C_o C_a}{C_o + C_a}$, 而 $C_o = \frac{\epsilon_{ox} \epsilon_o}{d_{ox}}$, $C_a = \frac{\epsilon_o}{d_a}$, C_{ao} 为栅极和半导体沟道表面的栅电容; C_a 为空气间隙中的电容; C_o 为氧化物层的电容; ϵ_o 为真空的介电常数($\epsilon_o = 8.85 \times 10^{-14}$ F/cm); ϵ_{ox} 为氧化膜的相对介电常数($\epsilon_{ox} = 3.9$); d_a 为当压力施加时, 空气间隙的真实值; d_{ox} 为氧化膜厚度; W 为场效应管沟道宽度; V_G 为栅极电压; V_D 为漏极电压; μ 为电子迁移率; L 为场效应管沟道长度; V_T 为开启电压。

沟道中有电流产生时, 开启电压为

$$V_T = \phi_{ms} + 2\phi_B - Q_f / C_{ao} + [4\epsilon_s \epsilon_o q N_a \phi_B]^{1/2} / C_{ao}$$

式中 $\phi_B = \frac{kT}{q} \ln(N_a / n_i)$, ϕ_B 为 P 型硅衬底体电势; k 为玻尔曼兹常数($k = 1.3807 \times 10^{-23}$ J/K); T 为温度(K); q 为电子电量($q = 1.6 \times 10^{-19}$ C); N_a 为 P 型硅中受主杂质浓度; n_i 为硅中本征载流子的浓度; ϕ_{ms} 为功函数差; Q_f 为栅极氧化层的氧化物电荷; ϵ_s 为硅的相对介电常数($\epsilon_s = 11.9$)。在夹断区域, 漏电流 I_D 计算公式为

$$I_D = \frac{1}{2} \mu C_{ao} \frac{W}{L} (V_G - V_T)^2 (1 + \lambda V_D),$$

式中 λ 为校正系数($\lambda = 0.0005$)。

当有压力施加于栅极膜片时, 空气间隙 d_a 发生变化, d_a 的变化引起了栅极电容 C_{ao} 的变化, 从而对漏电流 I_D 和开启电压 V_T 产生影响。随着外部压力 p 的增加, 膜片将向下变形, 变形值为 x , 间隙 d_a 减小, 因而 C_{ao} 和 I_D 增加, V_T 减小。如果 h 为方形膜片的厚度, a 为方形膜片的边长, E 为膜片材料(Si_3N_4) 的杨氏模量($E = 3.85 \times 10^{11}$ N/m²)。在方形膜片中央最大的变形值可由下式计算:

$$X_{\max} = 0.0138 p a^4 / (E h^3).$$

假设在无压力施加时, 空气间隙为 d_o , 有压力施加时, 方形膜片中央空气间隙的真实值

$$d_a = d_o - 0.0138 a^4 p / (E h^3). \quad (2)$$

$$\text{因此, 开启电压 } V_T = k_1(1 - k_0 p) + k_2, \quad (3)$$

式中

$$k_0 = 0.0138 a^4 / (E h^3 d_o),$$

$$k_1 = (d_o / \epsilon_o) [- Q_f + (4\epsilon_s \epsilon_o q N_a \phi_B)^{1/2}],$$

$$k_2 = \phi_{ms} + 2\phi_B.$$

从式(3)可见 V_T 与 p 成线性关系, 其微分灵敏度可由式(3)得到 $dV_T / dp = -k_0 k_1 = -0.796 \text{ mV/Pa}$, 由此可见, 该压力微传感器具有较高的灵敏度。

假设 MOS 场效应管工作在非饱和模式(或线性区域), 将式(2)、式(3)代入式(1)可得

$$I_D = k_3(1 - k_0 p)^{-1} + k_4, \quad (4)$$

式中

$$k_3 = \left[\frac{\mu \epsilon_o W}{L d_o} \right] (V_G - \phi_{ms} - 2\phi_B - V_D/2) V_D;$$

$$k_4 = \left[\frac{\mu W}{L} \right] [Q_f - (4\epsilon_s \epsilon_o q N_a \phi_B)^{1/2}] V_D.$$

而在饱和区域(或夹断区域), 漏电流为

$$I_D = [k_5(1 - k_0 p)^{-1/2} + k_6(1 - k_0 p)^{1/2}]^2 (1 + \lambda V_D),$$

$$\text{式中 } k_5 = \left[\frac{\mu W \epsilon_o}{2 L d_o} \right]^{1/2} (V_G - \phi_{ms} - 2\phi_B),$$

$$k_6 = \left[\frac{\mu W d_o}{2 L \epsilon_o} \right]^{1/2} [Q_f - (4\epsilon_s \epsilon_o q N_a \phi_B)^{1/2}].$$

适当参数的选择可使 MOS 场效应管在合适的开启电压下工作, 并对压力有较高的灵敏度。可选择如表 1 的参数。

表 1 参数表

Tab.1 List of parameters

参数	数值	参数	数值
膜片厚度 h	3 μm	沟道长度 L	12.7 μm
膜片宽度 a	200 μm	衬底杂质浓度 N_a	$2 \times 10^{21}/\text{cm}^2$
零压气隙间隔 d_0	0.5 μm	功函数差 ϕ_{ms}	0
沟道宽度 W	12.7 μm	氧化层电荷 Q_f	$1.3 \times 10^{-8}\text{C}/\text{cm}^2$
电子迁移率 μ	1000 cm^2/Vs	栅极电压 V_g	5V

对方程(1)进行仿真得到漏极电压与漏极电流的关系曲线如图 2 所示。从仿真的结果可看出, MOS 场效应管压力微传感器在不同压力下, 漏极电压与漏极电流的关系曲线与 MOS 场效应管的典型特性曲线相似, 每条曲线对应于不同的压力。在不同的压力下, 有相应的漏极电压与漏极电流的关系: 当漏极电压很小时, 漏极电流与漏极电压近似成正比, MOS 场效应管处于非饱和模式, 即线性区域; 当漏极电压较大时, 漏极电流饱和, MOS 场效应管处于饱和模式, 即夹断区域。压力越大, 使漏极电流开始饱和的漏极电压越大。压力变化引起栅极电容的变化, 从而导致漏电流和开启电压也发生变化。

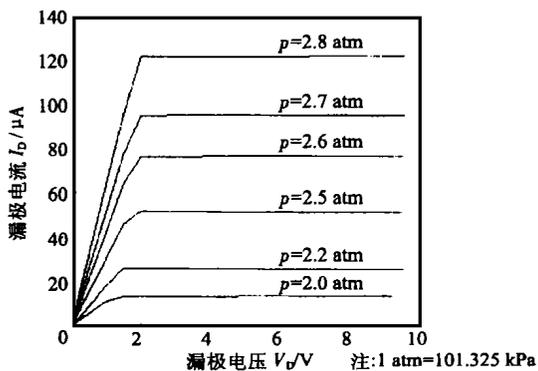


图 2 漏极电压与漏极电流关系曲线

Fig. 2 Curve of drain voltage and drain current

对式(4)进行仿真, 可得 MOS 场效应管在线性区域中压力与漏极电流的关系曲线如图 3 所示。随着作用于栅极膜片的压力的增大, 漏极电流也随之增大, 但漏极电流 I_D 与压力 p 成非线性关系。线性测量范围约为 1 ~ 1.7 atm, 在测量范围内非线性约为 2.3%。当 MOS 场效应管工作在线性区域时, 跨导 g_p (或微分灵敏度) 为

$$g_p = dI_D/dp = k_0 k_3 (1 - k_0 p)^{-2} \quad (5)$$

从方程(5)可知, MOS 场效应管的跨导 g_p 也是压力 p 的非线性函数

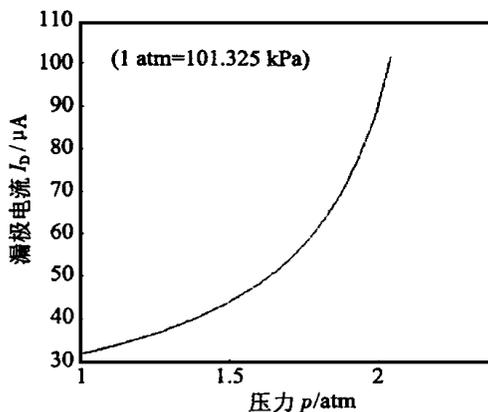


图 3 压力与漏极电流关系曲线

Fig. 3 Curve of pressure and drain current

3 结论

通过对 MOS 场效应管压力微传感器的结构和基本工作原理的分析, 并进行仿真, 证明了该传感器具有较高的灵敏度与稳定性。该传感器与信号处理电路集成在同一硅芯片上, 通过简单的电压-电流转换原理, 利用栅极电容的变化导致漏极电流与开启电压的变化而有效地测出压力的变化。

参考文献:

[1] 亢宝位. 场效应晶体管理论基础[M]. 北京: 科学出版社, 1985. 88- 89.
 [2] 江丕桓, 周国云, 黄运锐, 等. 场效应晶体管及其集成电路[M]. 北京: 国防工业出版社, 1974. 35- 80.
 [3] James T S, WEN H K. Pressure-sensitive insulated gate field-effect transistor (PSIGFET) [J]. Sensors and Actuators A, 1990, 21(1): 126 - 132

作者简介:

颜黄苹 (1975-), 女, 福建漳州人, 厦门大学机电工程系硕士研究生, 主要从事微系统的研究。