

横向电压型压力传感器 灵敏度的几何效应*

鲍敏杭 齐薇佳 王 言

(复旦大学电子工程系)

1986年11月17日收到

本文报道了制作在(001)硅长方膜中心区域的二组共十种几何设计的横向电压型压力传感器的灵敏度测试分析结果。得到了电源电极短路效应和输出电极短路效应引起的灵敏度几何因子与器件尺寸的关系。实验结果与数值分析所得的结果相当符合。这些结果为横向电压型压力传感器几何图形的设计提供了有用的准则。

一、引言

横向电压型压力传感器是八十年代初发展起来的一种新型半导体力敏器件^[1-3]。它用单个平衡输出的四端力敏电阻代替传统的由四个力敏电阻构成的压阻全桥。因此具有尺寸小，对称性好和成品率高等优点，非常有利于压力传感器性能的改善和器件的小型化，因而愈来愈受到人们的重视。

横向电压型压力传感器的基本部分通常是制作在硅膜上的一个长为 L 宽为 W 的矩形扩散电阻。如把硅膜平面的法向取作为 z 方向， z 轴取在电阻的长度方向则电阻内的电流和电场之间的关系可以写成

$$\begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \rho_1 & \rho_2 \\ \rho_3 & \rho_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_x \\ i_y \end{bmatrix}. \quad (1)$$

式中 E_x 、 E_y 和 i_x 、 i_y 分别为电场和电流沿电阻纵向和横向的分量。 ρ_1 是联系 z 方向(或 y 方向)的电流和该方向上电场的电阻率张量分量，它与无应力时的电阻率值 ρ_0 十分接近，即 $\rho_1 \approx \rho_0$ 。 ρ_2 是联系 z 方向(或 y 方向)电流与垂直方向电场之间关系的电阻率张量分量，它的大小与电阻所受的应力成正比关系。在矩形电阻纵向二端设置电极并加电压 V_x 时，形成的 z 向电场为 $E_x = \frac{V_x}{L}$ 。在 y 方向没有电流输出的条件下，从 $i_y = 0$ 和式(1)可以求得横向电场 E_y ，并由 $V_y = E_y W$ 得到横向电场引起的横向电压

$$V_{y0} = \frac{\rho_2}{\rho_1} \cdot \frac{W}{L} \cdot V_x. \quad (2)$$

* 中国科学基金资助的课题。

式中 W 为电阻的宽度。

实际上,由于电源电极的短路效应,式(2)仅在 $L \gg W$ 时才近似成立。除此之外,

为了引出横向电压,实际器件需采用图 1 所示的图形设计方式即输出电压由长为 l 宽为 s 的扩散臂引出。因此,除了电源电极短路效应之外,还有引出臂端头处的输出电极的短路效应。在考虑到这些因素之后,式(2)应修正为

$$V_y = \frac{\rho_s}{\rho_0} \cdot \frac{W}{L} \cdot V_x \cdot f. \quad (3)$$

式中 f 是一个修正因子,它与器件的几何尺寸有关。对 f 因子目前尚无解析求解的方法,只能用实验方法或数值分析的方法得到。本文介绍用实验测量几何尺寸对 f 因子影响的方法和结果,并与有限差分法计算的结果进行比较。

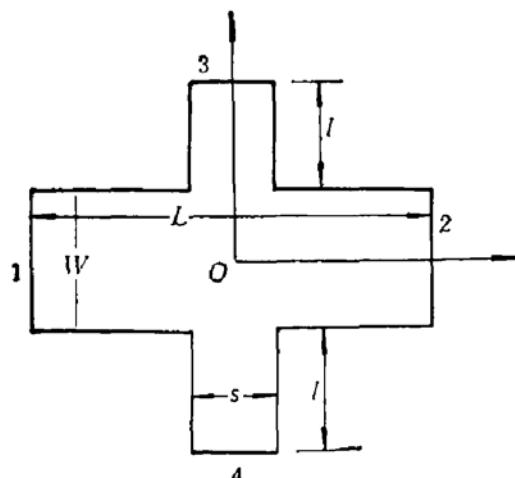


图 1 用于分析的器件几何图形及符号
1.2—电源电极 3.4—输出电极

二、实验方法描述

为了实验测量横向电压型压力传感器灵敏度的几何效应,共设计了二组实验。一组实验是在保持器件宽度和引出臂尺寸不变 ($W = 57 \mu m$, $l = 48 \mu m$, $s = 23 \mu m$) 的条件下,设计五个长度 L 不同的器件,以测量 f 因子随 L/W 的变化。五个 L/W 值为 1.0, 1.5, 2.0, 2.5 和 3.0。为了能在同样硅膜厚度条件下对不同器件作比较,五个器件设置在一个长 $2b = 2.6 mm$, 宽 $2a = 0.84 mm$ 的长方形硅膜上,在膜中心区域沿长轴 (y 轴) 上分布,如图 2 所示。如以膜中心为坐标原点,五个器件的中心位置 y_i 分别为 0.0 mm; 0.18 mm; -0.18 mm; 0.34 mm 和 -0.38 mm。另一组实验是在保持 L 、 W 和 s 不变 ($L = 85 mm$, $W = 57 mm$, $s = 23 mm$) 的条件下改变 l 值,使 l/s 为 0.125; 0.375; 0.625; 1.125 和 2.125。这一组器件在长方膜上的位置分布与前一组相同。为了获得最大的横向电压灵敏度,所有器件的取向都与硅膜的边缘方向 ([110] 或 [1-10]) 成 45° 角^[13]。

图 2 所示的电极边界条件可通过在端头处设置浓硼扩散区而获得。引线孔开在浓硼区上,这样也可以避免金-半接触不良的问题。由于浓硼区电阻率很低,所以浓硼区与淡硼电阻区的边界就可以考虑作为电极边界。

器件制作中,选用(100)晶向的 n 型单晶抛光硅片为材料,电阻率约为 $1\Omega \cdot cm$ 。器件的制作过程是,先在片子正面选择扩散浓硼电极端头区(薄层电阻 $R_s \approx 30\Omega$),然后用选择硼离子注入形成薄层电阻率约为 500Ω 的淡硼电阻率(工作区),在开引线孔和形成金属互连后,在硅片反面 SiO_2 上的适当位置光刻出腐蚀硅膜的

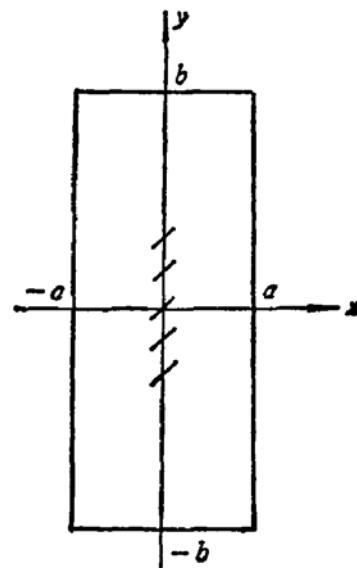


图 2 实验器件在硅膜上的设置

窗口。然后在保护正面的条件下，用 EPW 腐蚀液(邻苯二酚 3 克，乙二胺 17ml 和水 8ml) 腐蚀硅片直至形成厚度约为 $15\mu\text{m}$ 的矩形硅膜。制成的管芯经划片和适当的封装后即可进行压力灵敏度测试，一般是加 100mmHg 的压力测量各个器件的输出电压 V 。

三、实验结果的分析方法

本实验的目的是在其它条件相同的情况下观察几何尺寸对器件灵敏度的影响。为了避免膜厚的影响，我们将五个器件制作在同一个膜上。由于五个器件在膜上所在位置不同，在相同的压力下，它们所受到的应力存在着差别。因此，必须对各个器件的实测灵敏度数据根据位置进行一定的修正，然后才能互相比较。在 $b \gg 2a$ 的长方膜上，在均匀压力下，膜上各点的挠度能很好地用经典的格拉索夫公式^[4]来描述，在图 2 所示坐标系中，挠度 w 为

$$w = \frac{P(1-\nu^2)}{2Eh^3} \cdot \frac{(a^2-x^2)^2(b^2-y^2)^2}{a^4+b^4}. \quad (4)$$

式中 P 是作用于膜上的压力， ν 是泊松系数， E 为杨氏模量， h 为膜厚。利用应力与挠度的如下关系

$$\begin{cases} \sigma_1 = -\frac{Eh}{2(1-\nu^2)} \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \nu \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right) \\ \sigma_2 = -\frac{Eh}{2(1-\nu^2)} \left(\nu \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right). \end{cases} \quad (5)$$

式中 σ_1 是 x 方向的正应力， σ_2 是 y 方向的正应力(在长方膜的对称轴上，剪切应力为零)。将式(4)代入式(5)，得到

$$\begin{cases} \sigma_1 = \frac{P}{h^2(a^4+b^4)} [(b^2-y^2)^2(3x^2-a^2) + \nu(a^2-x^2)^2(3y^2-b^2)] \\ \sigma_2 = \frac{P}{h^2(a^4+b^4)} [(a^2-x^2)^2(3y^2-b^2) + \nu(b^2-y^2)^2(3x^2-a^2)]. \end{cases} \quad (6)$$

把式(2)中的 ρ_s/ρ_0 定义为器件的灵敏度因子，它是器件坐标 y_i 的函数，故记为 $s(y_i)$ ，由文献[5]可知

$$s(y_i) = -\frac{1}{2} \pi_{44}(\sigma_1 - \sigma_2). \quad (7)$$

由式(7)得到

$$s(y_i) = \frac{1}{2} \pi_{44} \frac{P b^4}{a^4+b^4} \cdot \frac{a^2}{h^2} (1-\nu) \left[\left(1 - \frac{y_i^2}{b^2}\right)^2 - \frac{a^2}{b^2} \left(1 - 3 \frac{y_i^2}{b^2}\right) \right]. \quad (8)$$

对于矩形膜中心 ($y_i = 0$) 的器件

$$s(0) = \frac{1}{2} \pi_{44} \frac{P b^4}{a^4+b^4} \cdot \frac{a^2}{h^2} (1-\nu) \left(1 - \frac{a^2}{b^2}\right). \quad (9)$$

对于位于 $y = y_i$ 的器件，则有

$$s(y_i) = s(0)K(y_i). \quad (10)$$

其中

$$K(y_i) = \frac{(b^2 - y^2)^2 - a^2(b^2 - 3y^2)}{a^4 - a^2b^2} \quad (11)$$

即对几何尺寸完全相同的器件,它位于 $(0, y_i)$ 位置时器件的灵敏度相当于该器件位于膜中心时灵敏度的 $K(y_i)$ 倍。因此,为消除因器件位置不同而引进的差异,实验测得的各个器件的电压 $V_y(y_i)$ 应当除以 $K(y_i)$ 把它变换到该器件位于膜中心时的对应值 $V_y(0)$, 然后才能相互进行比较。

根据式(2)和式(3), f 因子可由测量值 V_y 与理想值 V_{y0} 之比求得,即 $f = V_y/V_{y0}$ 。由式(9)

$$V_{y0} = \frac{1}{2} \pi_4 \frac{P b^4}{a^4 + b^4} \cdot \frac{a^2}{h^2} \left(1 - \frac{a^2}{b^2}\right) (1 - \nu) \frac{W}{L} \cdot V_{ys} \quad (12)$$

可以看到 V_{y0} 与膜厚 h 有很灵敏的关系。由于工艺中硅膜厚度难以十分准确地控制,也难以精确地测定,因此不便由 V_{y0} 的计算值来得到 f 的绝对大小。

为了给实验测得的 f 值以确定的大小,并能与有限差分法(见附录)的结果作比较,我们令实验所得的 $f \sim L/W$ 曲线与有限差分法算得的曲线在 $L/W = 1$ 处相交。即根据计算得到的 $L/W = 1$ 时的几何因子 $f^* = 0.74$ 和 $L/W = 1$ 器件的实验输出电压 V_y^* 算得 ρ_s/ρ_0 的值为

$$\rho_s/\rho_0 = V_y^*/V_{ys} \cdot f^*. \quad (13)$$

利用这个数据和其它器件的输出电压 $V_{y,i}$,由式(3)得到对应的 f 值

$$f_i = V_{y,i} L f^* / W K(y_i) V_y^*. \quad (14)$$

式(14)是输入电极短路效应的 f 因子。对于输出电极的短路效应,由于 f 因子随 l/s 的变化比较小,且在 l/s 较大时很快趋向饱和,因此只要把理论和实验值都归一到一个大于 2 的 l/s 的器件就可以进行比较了。

实验数据处理中,我们还采用了如下的办法^[5,6]: 每个实验都记录了 8 个芯片上所有五个器件在 100mmHg 压力下的横向电压 V_y (V_y 为固定值)。通过上述方法求出各个器件的 f 因子值。为了消除不同芯片因膜厚以及其它工艺参数离散性引进的影响,我们将 8 组数据按组(标号 i)分别乘以一个权重因子 k_i ,然后对不同组的同一个器件求平均得到 $\bar{k}_i f_{ij} (\bar{k}_i V_{y,ij})$ 和 $\bar{k}_i f_{ij} (\bar{k}_i V_{y,ij})$ 对 $\bar{k}_i f_{ij} (\bar{k}_i V_{y,ij})$ 的误差。调整权重因子直到各个器件对应的误差的代数平均值小于一个设定的小数,然后求出各个器件对应的均方误差。

四、结果与结论

图 3 中的点子给出了几何因子 f 和 L/W 的关系以及输出电压 V_y 用最大输出电压 $V_{y,\max}$ 归一化的值 $V_y/V_{y,\max}$ 和 L/W 关系的实验结果,图中的曲线是用有限差分法计算的理论曲线,二者符合得很好。它们间拟合的相关系数分别为 0.93 和 0.999。

图 4 中的点子给出了反映输出电极短路效应的 $V_y/V_{y,\max}$ 和 l/s 关系的实验结果,曲线亦为用有限差分法计算的理论曲线,二者符合也较好,拟合的相关系数为 0.87。

由以上结果,我们从实验上得到了横向电压型压力传感器几何图形设计的如下原则:

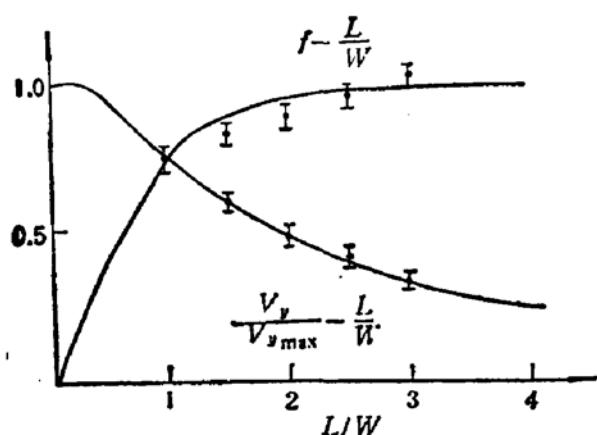


图3 几何因子和相对输出电压与 L/W 的关系
(曲线为计算结果, 点子为实验结果)

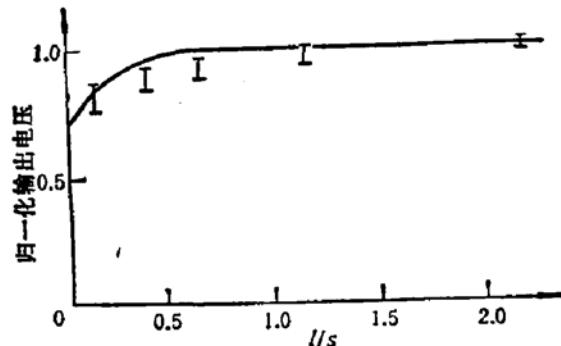


图4 归一化的输出电压与 I/s 的关系
(曲线为计算结果, 点子为实验结果)

(1) $\frac{L}{W}$ 一般选取在 1—2 之间, 为得到较高的灵敏度 L/W 宜取小些, 但功耗偏大, 为得到尽可能大的 f 因子, 则 L/W 应当取大些.

(2) 输出电极短路效应仅在 I/s 很小时才比较明显, 只要 I/s 大于 1, 就可基本上消除其影响, I/s 过长会使输出阻抗偏大.

作者感谢希德教授、唐璞山教授对本项目的热心支持. 工作中得到晋琦老师和沈加英同志的大力帮助和集成电路实验室其它同志的支持和帮助, 作者在此表示衷心的谢意.

附录 压阻器件的有限差分方程

对二维器件, 由式(1)可以得到

$$\begin{cases} j_x = \sigma_{xx} E_x + \sigma_{xy} E_y, \\ j_y = \sigma_{xy} E_x + \sigma_{yy} E_y, \end{cases} \quad (A.1)$$

其中 $\sigma_{xx} = \sigma_{yy} = \rho_i / \Delta$, $\sigma_{xy} = -\rho_s / \Delta$, $\Delta = \rho_i^2 - \rho_s^2$, j_x, j_y 为面电流密度, σ 为面电导率张量分量, 它与应力有关. 其中 $\sigma_{xx} = \sigma_{yy}$ 可记为 σ_0 . 由 $\nabla \cdot J = 0$ 的稳定条件, 得到

$$\sigma_0 \frac{\partial E_x}{\partial x} + \sigma_{xy} \left(\frac{\partial E_x}{\partial y} + \frac{\partial E_y}{\partial x} \right) + \sigma_0 \frac{\partial E_y}{\partial y} = 0. \quad (A.2)$$

把电场强度用电势 ψ 表示, 用 $E_x = -\frac{\partial \psi}{\partial x}$, $E_y = -\frac{\partial \psi}{\partial y}$ 代入 (A.2) 有

$$\sigma_0 \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + 2\sigma_{xy} \frac{\partial^2 \psi}{\partial x \partial y} + \sigma_0 \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} = 0. \quad (A.3)$$

求解电势分布的边界条件为:

非电极边界: (1)与 y 轴平行的边界

$$j_{x,t} = -\sigma_{0,t} \frac{\partial \psi}{\partial x} - \sigma_{y,t} \frac{\partial \psi}{\partial y} = 0. \quad (A.4)$$

(2) 与 x 轴平行的边界

$$j_{y,t} = -\sigma_{x,t} \frac{\partial \psi}{\partial x} - \sigma_{0,t} \frac{\partial \psi}{\partial y} = 0. \quad (A.5)$$

电极边界：电源电极： $V_1 = 0$, $V_2 = V_s$

输出电极：(1) 无输出电流： $V_3 = \psi_3$, $V_4 = \psi_4$

(2) 有输出电流： $V_3 = \psi_3$, $V_4 = \psi_4$

为了进行数值分析，必须把连续的微分方程和边界条件离散化，化为有限形式的线性代数方程组。有多种可能的途径导出离散方程，我们采用有限差分法。在均匀格子划分时， (i, i) 点的差分方程为

$$2\sigma_x(\psi_{i+1,j} + \psi_{i,j+1} + \psi_{i-1,j} + \psi_{i,j-1} - \Delta\psi_{i,j}) + \sigma_{xx}(\psi_{i+1,j+1} + \psi_{i-1,j-1} - \psi_{i-1,j+1} - \psi_{i+1,j-1}) = 0. \quad (\text{A-6})$$

由方程(A-6)结合各种边界条件即可以用数值计算得到电阻上电势分布。

参 考 文 献

- [1] Y. Kanda and A. Yasukawa, *Sensors and Actuators*, 3, 283 (1982).
- [2] Y. Kanda, *Sensors and Actuators*, 4, 199 (1983).
- [3] 鲍敏杭, 王言, 复旦大学学报(自然科学版), 24, 315(1985).
- [4] A. E. H. Love, *Mathematical Theory of Elasticity*, Dover publications, New York (1944), P495.
- [5] 鲍敏杭, 王言, 复旦大学学报(自然科学版), 25, 268(1986).
- [6] 王言、鲍敏杭, 半导体学报, 7, 522(1986).

Geometric Effect of Transverse-Voltage Pressure Transducer's Sensitivity

Bao Minhang, Qi Weijia and Wang Yan

(Department of Electronic Engineering, Fudan University)

Abstract

The sensitivity of two groups of transverse-voltage pressure transducers fabricated at the central area of rectangular diaphragms is measured. The geometric factor of sensitivity related to device geometry resulting from short-circuit-effect of power supply electrodes and output electrodes can be obtained. The experimental results agree well with the results from the theoretical calculation. The design rules for transverse voltage pressure transducers are then obtained.