

提高方形硅膜压力传感器灵敏度的几个重要措施

冯景星
(物理系)

提 要 结合扩散硅压阻式压力传感器的研制, 根据硅的压阻效应原理, 利用方形硅膜的应力分布公式, 论述了提高正方形硅膜压阻式压力传感器灵敏度的几个重要措施.

关键词 硅膜; 压力传感器; 灵敏度; 压阻

1 压阻式压力传感器的基本原理

当硅晶体某一方向受到压力时, 半导体硅的电阻率就会改变. 设方形硅膜桥路桥臂上的电阻为 R , 长为 l 横截面为 S , 则

$$R = \rho(l/s) \tag{1}$$

当电阻 R 受力时其阻值变化为 dR

$$dR = (\rho/s)dl - \rho(l/s^2)ds + (l/s)d\rho$$
$$dR/R = dl/l - ds/s + d\rho/\rho$$

对于半导体硅, 上式中 $d\rho/\rho$ 变化很大, 而 dl/l 与 ds/s 变化很小, 可以忽略, 则 $dR/R = d\rho/\rho$ 或 $\Delta R/R = \Delta\rho/\rho$. 令

$$\Delta R/R = \pi\sigma = \pi_l\sigma_l + \pi_t\sigma_t \tag{2}$$

式中: π 为压阻系数, σ 为应力.

理论上可求得任意晶向横向压阻系数(π_t)与纵向压阻系数(π_l)为

$$\pi_l = \pi_{11} - 2(\pi_{11} - \pi_{12} - \pi_{44})(l_1^2 m_1^2 + m_1^2 n_1^2 + l_2^2 n_1^2) \tag{3}$$

$$\pi_t = \pi_{12} + 2(\pi_{11} - \pi_{12} - \pi_{44})(l_1^2 l_2^2 + m_1^2 m_2^2 + n_1^2 n_2^2) \tag{4}$$

其中: π_{11} 为纵向压阻系数, π_{12} 为横向压阻系数, π_{44} 为剪切压阻系数

设 P 为 (100) 晶面内的任一晶向, P 与 2 轴的夹角为 α , q 为 P 的横向, P 与 q 的方向余弦分别为 $l_1 m_1 n_1$ 与 $l_2 m_2 n_2$, 如图 1(a) 所示. 对于 P 型硅, π_{11} 、 π_{12} 较小, 可以忽略, 只计 π_{44} . 因此由 (3) 式与 (4) 式可求得:

$$\pi_l = (\pi_{44}/2)\sin^2 2\alpha \tag{5}$$

$$\pi_t = -(\pi_{44}/2)\sin^2 2\alpha \tag{6}$$

由 (5)、(6) 两式可得 P 型硅 (100) 晶面内压阻系数的分布如图 1(b) 所示. 图形对 2 轴 [010] 轴晶向与 3 轴 [001] 晶向对称, 在 [011] 晶向与 [0 $\bar{1}$ 1] 晶向压阻系数为最大. 而且可得:

$$\pi_1 = (1/2)\pi_{44} \tag{7}$$

$$\pi_1 = -(1/2)\pi_{44} \tag{8}$$

由此可见, 为了提高方形膜扩散硅压力传感器的灵敏度, 在设计版图时, 方形膜上的桥臂电阻应分布在压阻系数最大的晶向上。

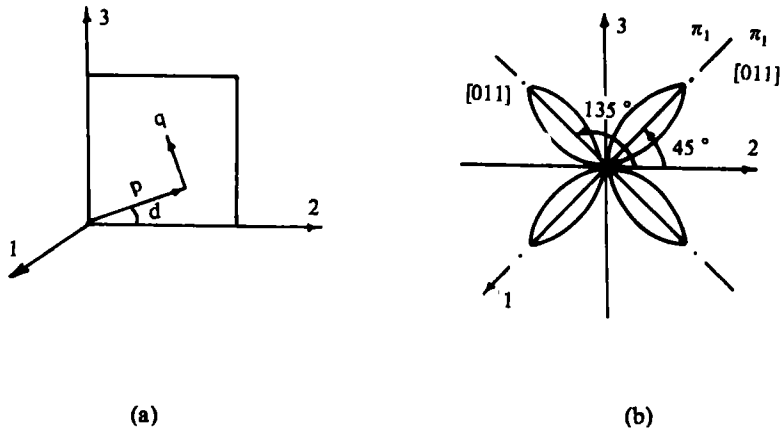


图1 P型硅[100]晶面内压阻系数分布图

2 方形硅膜的应力分布

由弹性力学, 变曲面小挠度线性理论(硅膜厚度 >> 挠度)采用变分法近似求解可得正方形膜边长为 $2l$ 时, 硅膜的应力分布如下:

$$\begin{cases} \bar{\sigma}_x|_{y=0} = -0.01869\bar{x}^6 + 0.8259\bar{x}^4 + 0.9624\bar{x}^2 - 0.5688, \\ \bar{\sigma}_y|_{y=0} = -0.0534\bar{x}^6 + 0.02253\bar{x}^4 + 1.029\bar{x}^2 - 0.5688, \\ \bar{\sigma}_x|_{y=1} = 0.1949\bar{x}^6 + 0.03998\bar{x}^4 + 0.6646\bar{x}^2 + 0.4297, \\ \bar{\sigma}_y|_{y=1} = 0.5568\bar{x}^6 + 0.1142\bar{x}^4 + 1.8989\bar{x}^2 + 1.2278, \end{cases} \tag{9}$$

其中: $\bar{\sigma}_x = \sigma_x / [(Pl^2)/h^2]$; $\bar{\sigma}_y = \sigma_y / [(Pl^2)/h^2]$; $\bar{x} = x/l$ (10)

$\bar{\sigma}_x$ 、 $\bar{\sigma}_y$ 与 \bar{x} 的关系如图2所示. 其中 $R(k\Omega)$ 为硅膜上的阻值分布.

由图2可见, 越靠近方形膜边缘, 曲线的斜率越大, 在边缘处应力 $\bar{\sigma}_x$ 、 $\bar{\sigma}_y$ 达到最大值.

为了提高器件的灵敏度, 在版图设计时, 方形膜上的桥路电阻应尽量靠近膜边缘, 将硅膜上四个桥臂电阻, 其中一对与膜边平行, 另一对桥臂电阻与膜边垂直并分为二段, 如图3所示.

由(9)、(10)两式可求得垂直方膜边长电阻上受到应力为

$$\begin{cases} \sigma_1 = 0.5647(Pl^2)/h^2 \\ \sigma_2 = 0.1663(Pl^2)/h^2 \end{cases} \quad (\bar{x} = 0.85) \tag{11}$$

由(9)、(10)两式求得平行方膜边长电阻上受到的应力为

$$\begin{cases} \sigma_l = 0.2511(Pl^2)/h^2 \\ \sigma_t = 0.7604(Pl^2)/h^2 \end{cases} \quad (\bar{x} = 0.90) \quad (12)$$

将(7)、(8)、(11)、(12)代入(2)式可得平行方形硅膜边力敏电阻在压力作用下,阻值的相对变化为

$$(\Delta R/R)_\parallel = \pi_{44}/2(\sigma_l - \sigma_t) = -0.2546\pi_{44}(Pl^2)/h^2 \quad (13)$$

垂直方膜边,电阻在压力作用下阻值的相对变化为

$$(\Delta R/R)_\perp = \pi_{44}/2(\sigma_l + \sigma_t) = 0.1992\pi_{44}(Pl^2)/h^2 \quad (14)$$

正方形膜扩散硅压阻式压力传感器,在恒压源 $V_E = 10V$ 下,灵敏度由下式决定

$$\Delta V_0 = 10 \times \{[(\Delta R/R)_\perp - (\Delta R/R)_\parallel] / [2 + (\Delta R/R)_\perp + (\Delta R/R)_\parallel]\} \quad (15)$$

若设计承受满量程压力为 $0.196MPa$, 硼扩散表面浓度为 $10^{19}/cm^3$ 时, $\pi_{44} = 10^{-9}Pa^{-1}$, 将以上数值及(13)、(14)代入(15)则得

$$\Delta V_0 = 0.451^2/h^2 (mV) \quad (16)$$

改变膜的边长与厚度可得不同的灵敏度 ΔV_0 , 如表1.

表 1 方膜边长与厚度与对灵敏度的影响

方膜 1/2 边长 L/mm	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	1	1	1	1	1	1.5	3
方膜厚度 $h/\mu m$	40	45	50	55	60	40	45	50	55	60	40	40
灵敏度 $\Delta V_0/mV$	70	55.5	45	37	31	280	225	180	148	125	630	2530

由此可见,正方形硅膜扩散硅压力传感器灵敏度是与其膜边长平方的 0.45 倍成正比,与膜的厚度平方成反比.

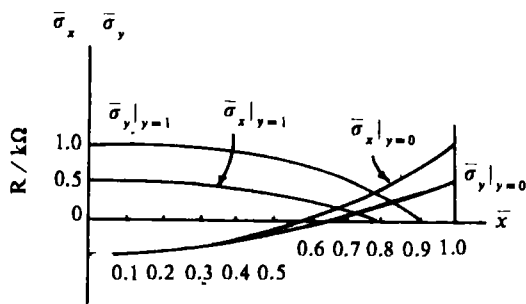


图 2 正方形膜片上 $\bar{\sigma}_x$ 、 $\bar{\sigma}_y$ 与 \bar{x} 的关系曲线

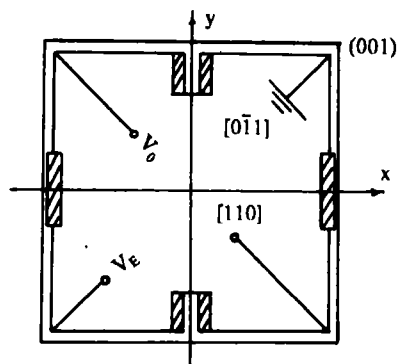


图 3 正方形硅膜上力敏电阻的分布

3 结论

由以上论述可以得出提高正方形硅膜压阻式扩散硅压力传感器灵敏度的几个重要措施。

(1) 正方形硅膜的正确制取. 当选用材料为: n-Si(100)晶面时, 采用异向蚀刻制取正方形硅膜. 光刻时, 掩模版的正方形边界应严格与硅片的[110]晶向或 $[1\bar{1}0]$ 晶向对准, 异向蚀刻后的硅膜图形在显微镜下观察, 正方形的四个角应为直角, 如果直角出现圆弧, 说明晶向没有对准, 则器件的灵敏度会显著地降低.

(2) 力敏电阻的晶向选择. 桥路的四个电阻应分布在压阻系数最大的晶向上, 即[110]与 $[1\bar{1}0]$ 晶向上, 由应力分析可知越靠近方形硅膜边缘的应力越大, 在方形膜边界上应力最大. 因此将桥路四个电阻其中一对力敏电阻与正方形硅膜边界平行(与[110]晶向对准), 并尽量靠近正方形膜边缘, 另一对力敏电阻与方形膜边界垂直并尽量靠近边界中点分成二段, 四个力敏电阻的分布如图3所示.

(3) 在满足零位温漂及灵敏度温漂的条件下, 减薄硅膜厚度, 由表1可知能显著地提高器件的灵敏度(硅膜减至最小厚度由公式 $h = c\sqrt{\rho}$ 决定).

(4) 在不影响生产效率的条件下, 适当增大硅膜的边长(由表1可知)也能显著地提高器件的灵敏度.

参考文献

- 1 秦继昌等. 开发正方形膜扩散硅集成功敏器件的设计与分析. 见: 中国仪器仪表学会, 全国传感器及其应用学术会议论文. 武汉: 出版者不详, 1984

Important Measures for Increasing Sensitivity of Square Silicon Diaphragm Pressure Transducers

Fen Jingxing

(Department of Physics)

Abstract Based on the principle of silicon piezoresistive effect and the stress distribution formula of the square silicon diaphragm, some important measures must be take to increase the sensitivity of the square silicon diaphragm piezoresistive pressure transducers.

Keywords silicon diaphragm; pressure transducers; sensitivity; piezoresistive