

文章编号: 1005-8893 (2002) 04-0047-03

# 压力传感器的应力计算\*

周 侗<sup>1</sup>, 李 格<sup>2</sup>, 李金华<sup>1</sup>

(1. 江苏石油化工学院 功能材料实验室, 江苏 常州 213016; 2 江苏石油化工学院)

摘要: 从弹性力学的板壳理论出发, 对不同参数的凸型板结构变形膜受压后的应力分布作了近似计算, 为高线性度 SOI 压力传感器的芯片设计提供了理论指导。用 BESOI 技术研制的凸型板结构集成压力传感器的非线性度达 0.09%, 样品灵敏度的实测值与应力计算理论值的差别约 17%。

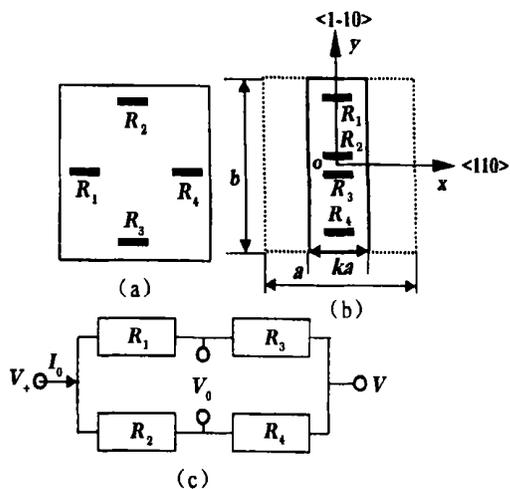
关键词: 板壳理论; 压力传感器; 应力计算

中图分类号: O 343.9; O 484.2 文献标识码: A

压力传感器是用途十分广泛的探测器件。从应变片式压力传感器到扩散硅压力传感器是一大进步, 使体积大大缩小, 结构更加简单。SOI (Silicon On Insulator) 传感器的出现为发展制作高性能集成压力传感器提供了条件。

压力传感器芯片受压后的输出信号来源于桥电阻的压阻效应, 形变膜形变时应变电阻所受应力的分布大小直接决定了传感器的输出灵敏度。另外, 桥电阻在形变膜上的位置分布不但影响传感器的灵敏度, 而且影响传感器输出信号的线性度。我们从弹性力学的板壳理论出发, 对凸型板结构变形膜受压后的应力分布作了近似计算, 设计了一种凸型板结构的高线性度压力传感器, 用 BESOI (Bonding and Etch-back SOI) 技术和集成电路工艺实现了这种设计。本文将对应力计算作简要介绍。

力, 也可使应力放大, 提高输出灵敏度。



(a) 常规分布; (b) 凸型板上分布; (c) 桥电阻连接

图1 桥电阻分布

## 1 结 构

通常, 压力传感器的形变片采用平板形式, 两对桥电阻分布在 4 边 (图 1 (a))。我们设计的形变片采用凸型板结构 (图 2), 4 个桥电阻同方向地对称分布在板凸出部分的边缘和中部 (图 1 (b))。根据材料力学的知识<sup>[1]</sup>, 凸型板可使形变的中性轴向下部移动, 既加大了拉应力保护, 提高过载能

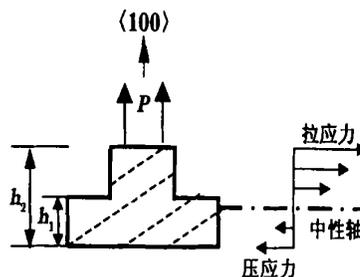


图2 凸型板的应力放大示意

\* 收稿日期: 2002-07-06

作者简介: 周侗 (1946-), 男, 江苏无锡人, 副教授。

## 2 应力计算

依据压力传感器原理<sup>[2]</sup>, 对如图 1 (b) 的设计, 二对桥电阻沿同一晶向且芯片制备时,  $R_1 \sim R_4$  个电阻相等。不受压时电阻桥无输出, 桥电阻受压时, 由于膜上应力  $\sigma$  随着  $y$  的增加而迅速增大, 使电阻桥有了输出电压。当用恒流源  $I_0$  供电时, 求出电阻桥的等效电阻和两臂电流  $I_1, I_2$ , 可得到输出电压信号与外加压强成线性关系:

$$V_0 = I_1 R_1 - I_2 R_2 = I_0 R_0 (K_1 - K_2) p / 2$$

对 (100) 晶面的矩形硅膜和如图 1 (b) 的电阻分布, 桥电阻受压时, 电阻的变化与受力前阻值的比为<sup>[2]</sup>:

$$\frac{\Delta R}{R_0} = \Pi_x \sigma_x + \Pi_y \sigma_y = \frac{\Pi_{44} (\sigma_x - \sigma_y)}{2}$$

式中:  $\Pi_x, \Pi_y$  分别为硅沿  $\langle 110 \rangle$  向和  $\langle 1-10 \rangle$  的压阻系数,  $\sigma_x, \sigma_y$  为上述两方向的应力,  $\Pi_{44}$  为硅材料的剪切压阻系数, 表示剪切应力对电阻率张量的影响。当计算出电阻所在位置的应力  $\sigma_x, \sigma_y$  后, 利用已知的硅的剪切压阻系数  $\Pi_{44}$  就可以从理论上计算出不同设计的输出信号的大小。

对这种结构的形变膜, 弹性力学不能给出应力分布的解析解, 我们用厚度不均匀的四边固支方板模型对该板的凸出区的应力分布作了近似计算, 坐标的建立如图 1 所示。由伽辽金法<sup>[3]</sup>对 4 边固支受均匀载荷的薄板, 其挠度为:

$$W = \sum a_i \Phi_i = a_1 \Phi_1 + a_2 \Phi_2 + a_3 \Phi_3 + a_4 \Phi_4$$

式中:  $a_i$  为待定常数,  $\Phi_i$  由下式决定:

$$\Phi_1 = (x^2 - a^2/4)^2 (y^2 - b^2/4)^2$$

$$\Phi_2 = x^2 (x^2 - a^2/4)^2 (y^2 - b^2/4)^2$$

$$\Phi_3 = y^2 (x^2 - a^2/4)^2 (y^2 - b^2/4)^2$$

$$\Phi_4 = x^2 y^2 (x^2 - a^2/4)^2 (y^2 - b^2/4)^2$$

设矩形凸型膜长为  $a$ , 宽为  $b$ , 凸出区宽为  $ka$ , 厚为  $h_2$ , 凸出区两边膜厚为  $h_1$ , 左右较薄区的弯曲刚度为  $D$ , 则中间凸型区的弯曲刚度为  $\beta D, \beta = (h_2/h_1)^3$ 。由伽辽金方程:

$$D \int_{-b/2}^{b/2} dy \int_{-a/2}^{-ka/2} \nabla^4 W \Phi_i dx +$$

$$\beta D \int_{-b/2}^{b/2} dy \int_{-ka/2}^{ka/2} \nabla^4 W \Phi_i dx +$$

$$D \int_{-b/2}^{b/2} dy \int_{ka/2}^{a/2} \nabla^4 W \Phi_i dx =$$

$$D \int_{-b/2}^{b/2} dy \int_{-a/2}^{a/2} p \Phi_i dx \quad (i = 1, 2, 3, 4)$$

可得到 4 个关于  $a_i$ , 即  $a_1, a_2, a_3, a_4$  的方程, 解该方程组即可得到  $a_i (a, b, k, \beta)$ , 求出  $W$  并代入形变膜凸出部分的弯矩方程:

$$M_y = -\beta D \left\{ \frac{\partial^2 W}{\partial y^2} + \mu \frac{\partial^2 W}{\partial x^2} \right\}$$

$$M_x = -\beta D \left\{ \frac{\partial^2 W}{\partial x^2} + \mu \frac{\partial^2 W}{\partial y^2} \right\}$$

式中:  $\mu = 0.3$  为硅的泊松比。

再利用应力与弯矩的关系式:

$$\sigma_x = \frac{6M_x}{h_2^2} \quad \sigma_y = \frac{6M_y}{h_2^2}$$

可算出凸型板上各点的应力分布  $(\sigma_x, \sigma_y)$ , 它们都是  $x, y, a, b, k, \beta$  的函数。即板的结构尺寸不同, 凸出区上点的位置不同, 沿  $x$  向和  $y$  向的应力也不同。利用桥电阻所在位置的  $\sigma_x, \sigma_y$  和已知 N 型硅的  $\Pi_{44} = 1.38 \times 10^{-9} \text{m}^2/\text{N}$  的实验数据, 就可算出  $\Delta R/R_0$  和输出信号  $V_0$  的理论值。

由于该关于  $a_i$  的方程很复杂, 不便在文章中写出, 我们用 Matlab 软件对它作了数值计算, 从而在输入  $x, y, a, b, k, \beta$  的值后, 即可方便地求出不同位置的应力  $\sigma_x, \sigma_y$ , 进而求出  $V_0$  的值。表 1 给出了不同的  $h_1, h_2, k$  或不同的  $a, b$  值时, 特定点的  $\sigma_x, \sigma_y$  及  $\sigma_x - \sigma_y$  的计算值。

为了检验该近似计算的精度, 我们用  $a = b, \beta = 1 (h_1 = h_2)$ , 即方板中心  $(x = y = 0)$ , 和边缘  $(x = 0, y = \pm b/2)$  的应力值, 与板壳理论的精确值<sup>[3]</sup>作比较, 差别仅为 1.1%。可见, 该近似计算是可信的。

## 3 实验验证

从表 1 可见, 对  $a = b$  的方膜,  $k = 0.25$  时, 只要使板的凸出度  $h_2/h_1 > 1.35$ , 就可使凸型板结构的输出灵敏度高于常规设计。即, 既可得到高的线性度, 又可有高的输出。而且, 应力计算还表明, 板上凸出区越窄, 应力值越大。

用键合减薄技术制备了前述 BESOI 压力传感器结构, 用集成电路工艺制备了应变电阻桥。凸型板的厚度为  $h_2 = 22 \mu\text{m}$ , 凸型板左右形变膜的厚度为  $h_1 = 13 \mu\text{m}$ 。凸出区的宽度采用  $k = 0.23, a = 1.95 \text{mm}, b = 1.83 \text{mm}$ 。为了降低应变电阻的温度系数, 梁上桥电阻用离子注入掺杂的 P 型硅薄膜电阻, 电阻层厚度约  $0.6 \mu\text{m}$ , 在无外加压力时, 桥电阻每臂为  $9 \text{k}\Omega$ 。

表 1 部分凸型板结构的应力计算值

$a/\text{mm}$	$b/\text{mm}$	$k$	$h_1/\mu\text{m}$	$h_2/\mu\text{m}$	$h_2/h_1$	$\sigma_x(0, 0.4b) / (\text{N}/\text{m}^2)$	$\sigma_y(0, 0.4b) / (\text{N}/\text{m}^2)$	$\sigma_x - \sigma_y / (\text{N}/\text{m}^2)$
2	2	0.25	22	22	1.00	-133.58	-815.31	687.73
2	2	0.25	16	22	1.35	-314.38	-1415.11	1100.73
2	2	0.25	15	22	1.47	-374.88	-1598.26	1223.38
2	2	0.25	14	22	1.57	-452.98	-1830.30	1377.32
2	2	0.25	13	22	1.69	-555.70	-2131.15	1575.45
2	2	0.25	11	22	2.00	-882.92	-3076.29	2193.37
2	2	0.25	17	25	1.47	-292.44	-1244.07	952.07
2	2	0.25	13	19	1.45	-497.82	-2128.40	1630.88
2	2	0.30	15	22	1.47	-359.22	-1495.19	997.37
2	2	0.20	15	22	1.47	-386.68	-1705.28	1318.58
3	2	0.25	15	22	1.47	-938.08	-2978.26	2035.18
2	3	0.25	15	22	1.47	87.28	-930.94	1018.22

图 3 是实验样品的测试结果, 用非线性度的计算公式:

$$L = \frac{V_0(P/2) - V_0(P)}{V_0(P)}$$

式中:  $P$  为样品的量程, 可得到样品的实测非线性

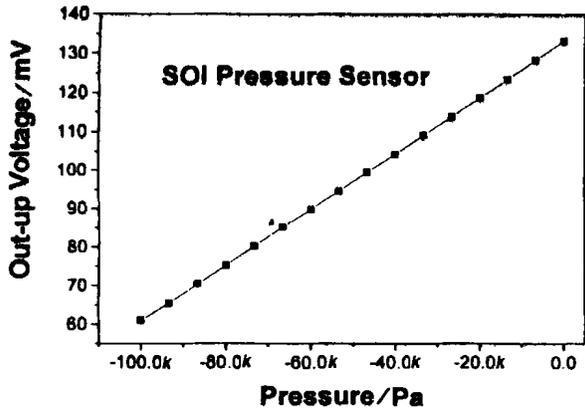


图 3 SOI 压力传感器输出特性

度优于 0.09%。其输出灵敏度为 0.78 mV/kPa。由于该传感器样品是绝压式的, 可加负压, 也可加正压, 图中结果是采用负压的测量结果。利用该样品实际结构数据及中央电阻和边缘电阻的位置 (0, 0.1b), (0, 0.4b) 等参数代入, 得到样品灵敏度的理论估算值为 0.92 mV/kPa。实验值与计算值

的差别约 17%。由于理论计算中用到形变膜厚度和  $J_{144}$  等实验数据<sup>[2]</sup>, 它们的测量误差也将直接影响实验值与计算值的差别。所以, 前述应力计算可为压力传感器的应变电阻提供设计指导。

## 4 结 论

从弹性力学的板壳理论出发, 对不同参数的凸型板结构形变膜受压后的应力分布作了近似计算, 为压力传感器的应变电阻桥的设计提供了理论指导。用 BESOI 技术研制的凸型板结构集成压力传感器的非线性度达 0.09%, 实测压力传感器样品的灵敏度与理论计算值的差别约 17%。

## 参考文献:

- [1] 陈心爽, 袁耀良. 材料力学 [M]. 上海: 同济大学出版社, 1996. 173-133.
- [2] 鲍敏杭, 吴宪平. 集成传感器 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1987. 63-83.
- [3] 铁摩辛柯 S. 沃诺斯基 S. 板壳理论 [M]. 板壳理论翻译组译. 北京: 科学出版社, 1977. 207-214, 369-371.

## Stress Calculation of Pressure Sensor

ZHOU Ti<sup>1</sup>, LI Ge<sup>2</sup>, LI Jin-hua<sup>1</sup>

(1. Functional Materials Laboratory, Jiangsu Institute of Petrochemical Technology, Changzhou 213016, China; 2. Jiangsu Institute of Petrochemical Technology)

**Abstract:** The stress distribution on the convex plate of different sizes under uniform pressure was calculated approximately by plate-shell theory of elastic-mechanics. It could provide a theoretical guide for chip design of high linearity pressure sensor. A BESOI pressure sensor with un-linearity of 0.09% was prepared on a convex beam, the difference of the output sensitivity between theoretical calculation and the measurement result was about 17%.

**Key words:** plate-shell theory; stress calculation; pressure sensor