

集成传感器文集

译文专集

第二分册

航空航天部七七一研究所

集成传感器文集

第二分册

航空航天部七七一研究所

一九八八年五月一日

集成传感器文集

第二分册

译文专辑

1、集成压力传感器	1
2、MOS集成压力传感器	6
3、CMOS集成硅压力传感器	14
4、多晶硅压力传感器	23
5、多晶硅的压阻特性	28
6、集成多用传感器芯片	34
7、高温超小型固态压力传感器的进展	40
8、硅压阻传感器的温度灵敏度	54
9、可在300℃下使用的微型压力传感器	75
10、横向标准压力传感器采用各向异性刻蚀法的主要 优点	82
11、采用阳极氧化自停腐蚀法制作压敏传感器的硅膜片	89
12、集成灵敏传感器的固态封接和组装技术	94

集成压力传感器

I O技术发展惊人，特别是以微处理器为代表的LSI向高集成度，高功能化迅速进步，半导体传感器也以I O为核心，根据计测和控制技术的要求，相应稳步地继续发展。

应用硅压阻效应的压力传感器，有效地利用其体形小，灵敏度高特性，在工业计量和医疗仪器等范围内，被广泛地利用。硅不仅在电气性能上而且在机械性能上都是稳定的材料。最近利用I O技术的微细加工技术，所以可能更加小形、高功能化。

如果在急剧变化的环境、宽的温度范围和高电磁噪音下使用传感器，必须能正确地检测出物理量，传递信号。利用压阻效应的压力传感器的输出电压，通常为数十mV。为了提高传感器信号的信噪比和可能同微计算机系统进行连接，有必要把传感器的输出电压进行放大。在传感器的近旁设计放大器，当然对提高信噪比有利。最近，在同一外壳里，已纳入放大器，成为典型的混合I O。更进一步，在同一硅片上制作放大器，推进所谓单片型压力传感器的开发。

把单片集成压力传感器的实用化作为目标。本文首先介绍最新试制的整体化的测量元件、温度补偿回路、放大器和信号处理回路；然后介绍输出级的电压输出和周波数输出的两种提取方式的集成压力传感器。

【设计】

集成压力传感器设计可分为压阻桥设计、隔膜设计和信号处理回

路设计三个主要项目。图 1 表示试制的集成压力传感器的框图。压阻桥作为压力测定元件通常可由压力作用于隔膜而形成。作为输出，能够提供电压和周波数的变化，温度补偿回路，放大器等信号处理回路，通常可以在隔膜外围硅片上形成。图中，左侧为电压输出处理回路，右侧为周波数输出处理回路。这些回路均可以独立进行温度补偿和灵敏度调整。下边叙述各部分的设计要点：

(1) 压阻电桥。用 4 个压阻元件连接构成电桥回路，把压阻的变化，有效地变换成输出电压。其设计要点是：(1) 尽量获得高灵敏度；(2) 地残留误差电压做小；(3) 把热输出（0 点温漂）做小。其(1)，决定于压阻元件在结晶方位上的配置和在隔膜上的位置，4 个压阻元件必须有效地配置。其(2)，由于电桥电路会发生不平衡，把 4 个压阻元件的阻值配对是重要的，必需把尺寸形状误差和杂质浓度偏差做小。其(3)，原因是 4 个压阻元件温度特性的差异，同(2)一样，把杂质浓度偏差做小，和接近配置热不平衡因素。考虑以上各点，压阻桥的构成如图 2(a) 所示。一般认为，(100) 晶面上的压阻元件 R_1, R_3 在 $\langle 110 \rangle$ 方向， R_2, R_4 在 $\langle 1\bar{1}0 \rangle$ 方向。4 个压阻元件有限靠近配置，以减低残留误差电压和温漂。用 P 形硅形成压阻元件，纵向和横向压阻系数的绝对值相等而符号相反。因此，4 个压阻元件的电阻变化，可以近似用(1)和(2)式表示。

$$\frac{\Delta R_1}{R_1} = \frac{\Delta R_3}{R_3} = \frac{1}{2} \pi_{44} (\sigma_x - \sigma_y) \quad (1)$$

$$\frac{\Delta R_2}{R_2} = \frac{\Delta R_4}{R_4} = -\frac{1}{2} \pi_{44} (\sigma_x - \sigma_y), \quad (2)$$

$$= 2 =$$

这里, π_{44} 决定于电阻系数, σ_x 及 σ_y 是 x 和 y 方向的应力分量。 x 方向的 R_1, R_3 与 y 方向的 R_2, R_4 , 其阻值绝对值相等, 符号相反, 见图 2 (b), 以有效地提取输出电压。

(2) 隔膜。其设计要点是: (1) 考虑小尺度 IC 芯片中会发生局部变形; (2) 要求加工精度要高。为此, 隔膜形状选矩形 (图-3), 用碱性刻蚀液, 各向异性刻蚀法加工。硅 (100) 晶面作衬底, 由开口部向内侧倾斜 35° 角深入刻蚀, 此倾斜面是 (111) 结晶面。由于硅衬底的厚度为 t , 矩形隔膜的一边长度为 $2a$, 刻蚀掩膜开口部分大小可用式 (3) 表示。制造尺寸必须先把 $2d$ 估计在内。

$$2d = 2(t - h) / 2 \quad (3)$$

这里, h 是需要的隔膜厚度, d 为边环宽度。

压阻桥放在隔膜最大应力作用域的中间。设隔膜形状为正方形, 压阻桥输出灵敏度 $\Delta V / V$ 与压力 P 的关系, 可以近似用式 (4) 表示。

$$\frac{\Delta V}{V} = \frac{1}{2} \pi_{44} (1 - \sigma) \frac{a^2}{h^2} P \quad (4)$$

这里, σ 是泊松比, 取 0.3。隔膜边长 $2a$ 为 1 mm , 厚度 h 为 $25 \mu\text{m}$, 压阻系数 π_{44} 为 $100 \times 10^{-12} \text{ m}^2 / \text{达因}$, 当在隔膜上施加 750 mm/mmHg 柱压力时, 按公式 (4) 得到压阻桥输出灵敏度大概为 10 mV/V 。

(3) 信号处理回路。电压输出信号处理回路的等价回路表示在图-4, 此回路由压阻桥 R_1, R_2, R_3, R_4 , 晶体管 Q_1 和 Q_2 构成

的恒流回路，差动放大器所组成。设计能得到的总增益约为100。压阻桥及其他全部电阻，在双极IC工艺步调扩散过程中同时形成。为得到相同的电阻温度系数，使压阻桥的热输出和放大器随温度的依赖性都很小。使用恒流电路进行压阻桥的灵敏度温度补偿。压阻桥的灵敏度随温度的上升而下降。这里，压阻桥本身是正电阻温度系数，可以是自补偿方式。压阻桥输出电压和处理回路的偏差电压均可用微调电阻 r_0 调整。

频率输出信号处理回路，由压阻桥 $R_1 \sim R_4$ ，晶体管 Q_1 和 Q_2 构成的恒流电路，差动放大器，频率变换器及输出缓冲回路所组成。设计能得到总增益约为40。频率变换器是电流控制振荡器，由运算放大器，定时电容 C_t 和电阻 R_t 构成。为得到稳定的TTL输出级，设计有末级缓冲回路。

〔 制 作 〕

集成压力传感器采用标准双极IC工艺制造。衬底使用P型硅(100)面，厚度 $420\mu\text{m}$ ，电阻率为 $3\Omega\cdot\text{cm}$ 。在衬底上进行磷埋层扩散，把约 $1\Omega\cdot\text{cm}$ 的外延层生长到 $10\mu\text{m}$ 。用深度选择扩硼形成P型隔离层，基极层，及压阻元件。扩散层的方块电阻为 $150\Omega/\square$ ，设定表面杂质浓度为 $2 \times 10^{18}\text{cm}^{-3}$ 。用高浓度扩磷形成发射层。使用蒸铝完成布线及电极部分。为使用刻蚀掩膜加工隔膜，在衬底内侧用低压CVD法形成氮化硅膜，用反应性离子刻蚀进行开窗。用各向异性碱性离子刻蚀形成隔膜。刻蚀速度大约为 $2\mu\text{m}/\text{分}$ 。

〔 特 性 〕

- $0 \sim 750 \text{ mmHg}$ 柱压力对应于 $1 \sim 4 \text{ V}$ 电压输出。
- 5 V 电源电压下, 输出灵敏度为 4 mV/mmHg 。
- 线性误差 $0.4\% \text{ F.S.}$ 以下。
- $20^\circ \sim 110^\circ \text{C}$ 范围内, 灵敏度温度系数在 $0.06\% / ^\circ \text{C}$ 以下。
- 残留误差温度系数为 $1.5 \text{ mmHg} / ^\circ \text{C}$ 以下。
- $0 \sim 750 \text{ mmHg}$ 柱压力对应频率变化约 30 KHz 。
- 压力 0 点标准 $f_0 = 210 \text{ KHz}$ 。
- 频率线性误差在 3% 以下。

宋 士 林

译自(日)《电子材料》

1984.7

MOS集成硅压力传感器

HIROSHI TANIGAWA等

摘要—已开发了一种MOS集成硅膜片压力传感器。它包括半桥电路中的两个压阻和一个新设计的带NMOS单运算放大器的简单信号调整电路。用带有温度灵敏集成反馈电阻的可变增益放大器正温度系数可以补偿半桥电路压力灵敏度的负温度系数。除了为形成薄膜片,使用了N、H、F、O各向异性腐蚀外,传感器是用标准IO工艺制作的。为减小引入的应力,用静电方法把硅片粘在玻璃板上。在0—70°C范围内,半桥电路灵敏度的温度系数为-1750 ppm/°C,通过补偿,在放大器输出端则变为低于+190 ppm/°C。在同样温度范围内,经26—dB的放大器之后,还可得到热输出失调漂移小于20 mV。

1. 引言

硅膜片压力传感器〔1〕,典型地由作为弹性材料的硅膜片〔2〕和通过向膜片扩入杂质而形成的压敏电阻组成。由于单晶硅具有极好的弹性,实际上,即使加静压力也不会出现蠕变和迟滞。硅压阻的压力灵敏度或量纲因子比薄金属膜电阻高许多倍。这是因为它有大的压阻系数〔3〕。然而,从连桥压阻得到的满刻度输出电压(几百毫伏)还不够大,不能直接作为输出连到A/D转换器上。而且,压阻传感器的灵敏度温度系数比普通的金属应变计的传感器大。因此,在压力传感系统中,必须要有带放大器的信号调整器和热补偿电路。最近,

已报导〔4〕—〔9〕了带放大器的集成压阻式压力传感器。信号调整电路是用双极单块技术〔4〕，〔5〕，〔7〕制作的。频率由压敏电阻控制的环振电路也是用双极 I·L 技术制成〔8〕，〔9〕。

一个压力传感器，典型地是由许多功能外围电路组合而成，例如这些电路有温度补偿电路（弥补和失调），A/D 转换器，总线接口及数控电路。如果用硅 IC 技术，在同一个传感器芯片上能制作出这些电路，那么，与普通的带金属规的金属膜片传感器〔10〕相比，就可廉价地提供小而轻的压力传感器。它们可以符合以微机为基础的系统对传感器日益广泛的要求。压力传感器可广泛用于诸如汽车，医药装置及工艺设备领域中。由于 MOS 技术的高集成度和低功耗特点，使它成为实现这种高集成传感器的合适技术。然而，至今尚未报导过带有用 MOS 制作调整器的集成压阻式压力传感器。

本文介绍了一种 MOS 集成硅膜片压力传感器〔11〕，它包括一个带单运放的新型简单电路。首先将介绍器件工作原理及电路结构。然后介绍压力传感器特有的器件制作技术以及实验得到的特性。

2. 器件的工作原理和电路结构

根据压阻效应，可按下式求出半导体电阻随外加应力而变化的关系〔12〕：

$$\Delta R/R = \pi_L \sigma_L + \pi_t \sigma_t \quad (1)$$

这里 ΔR 为电阻变化， R 为不加应力时起始电阻。加到电阻上的纵向和横向应力分别为 σ_L 和 σ_t ， π_L 和 π_t 分别为纵、横向压阻系数。它们取决于在晶体结构中的电阻排列。如图 1 所示，对于 P 型扩散电

阻来说, R_1 和 R_2 是在(100)面N-型硅方膜片上沿<110>方向排列的, 其压阻系数可近似地表示为〔12〕:

$$\pi_L = -\pi_T = \pi_{44}/2 \quad (2)$$

这里, π_{44} 为沿[111]晶轴定义的压阻系数。那么, 可用下式简单表示出电阻的变化

$$\Delta R_1/R_1 = -\Delta R_2/R_2 = \pi_{44}(\sigma_{1y} - \sigma_{1x})/2 \quad (3)$$

这里, σ_{1x} 和 σ_{1y} 是对电阻 R_1 产生的 x 和 y 方向上的应力。它们同加于膜片上的流体压力 P 成比例。当把半桥电路中的 R_1 和 R_2 连接起来, 并用 V_{EXC} 激励这个桥, 那么可用下式表示输出电压 V_0 及其压力灵敏度 S

$$V_0 = \pi_{44}(\sigma_{1y} - \sigma_{1x})V_{EXC}/4 \quad (4)$$

$$S = (1/V_{EXC})(\partial V_0/\partial P) \\ = (\pi_{44}/4) \partial(\sigma_{1y} - \sigma_{1x})/\partial P \quad (5)$$

进而可用下式表示压力灵敏度的温度系数:

$$(1/S)(\partial S/\partial T) = (1/\pi_{44})(\partial \pi_{44}/\partial T) \quad (6)$$

就如图1所示的电阻排列而言, 由于 $\partial \pi_{44}/\partial T$ 为负值, 所以可得到负的温度系数。因此, 随工作温度增加灵敏度下降。在设计集成压力传感器时, 必须采用信号调整器在电学上对负的温度系数予以补偿。

信号调整器广泛用于放大由金属膜片应变计型桥电路产生的小输出电压。它由带有三个运算放大器的检测放大器组成, 以获得稳定的高增益和高共模抑制比。虽然硅膜片式压力传感器比用金属条量规的金属膜片传感器有较高的灵敏度, 但仍需加信号调整器, 因为压力灵

敏度和在外加压力为零时的失调电压对工作温度是灵敏的。然而，在集成传感器中，由于传感器和信号调整器被放于同一硅芯片上并紧靠在一起，所以没有外来的共模噪声进入传输线。因此，在设计集成信号调整器时，不必仿效检测放大器技术。此时电路设计的中心应放在改进灵敏特性所作的温度补偿以及为易于生产而简化电路结构上。

在图2中示出了集成传感器电路。在膜片边缘上扩入的P型压阻(R_1 和 R_2) (见图1)连接成半桥电路。它们的电阻随外加压力而改变，一个电阻随压力增加而增加，而另一个随压力增加而减小。用带有不反相反馈电路的MOS运算放大器对桥输出电压进行放大。同时，用制作压敏电阻同样的工艺制作了与压力无关的用于反馈电路中的电阻 R_G 。增益设定电阻 R_0 是外接到反相输入端的，同时为失调补偿，把它的另一端偏置到 V_{offset} 。

提出的传感器特性如下：

1) 当设定P型电阻(R_1 ， R_2 和 R_G)杂质浓度为 3×10^{18} 或 $1 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ 时，压阻计因子(π_{44})的温度系数(负值)等于 R_G 电阻温度系数(正值) [12]。那么，由 π_{44} 产生的压力灵敏度的负温度系数可被由 R_G 改变的放大器增益的正温度系数所补偿。

2) 非反相的放大器增益 $1 + R_G/R_0$ 与压阻无关。

3) 与采用带有源器电阻惠斯通电桥(全桥)相结合的双极检测放大器相比，可实现单一放大器输入端失调补偿及低功耗。

4) 由于在MOS输入级不存在输入失调电流，所以，在确定接在放大器输入端上的全部电阻时，增加了它们的设计容差。

运算放大器电路如图3所示，它由差分输入级，差分到单端转换

级，栅—阴极，输出级和相补偿电路组成。这个电路跟随一个常见的 MOS 运算放大器 [13]，它是用几个增强/耗尽放大级设计而成，使之很少受工艺参数影响。

3. 器件制作

图 4 示出了制作器件的截面图。起始材料为 n 型 (100) 面的硅衬底。用硼离子注入制作表面杂质浓度为 $3 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ 的两个电阻。一个 (R_1) 平行于 $\langle 110 \rangle$ 膜片边缘方向，另一个 (R_2) 垂直于 $\langle 110 \rangle$ 膜片边缘方向。每个压敏电阻由两个平行的电阻 ($100 \mu\text{m}$ 长， $20 \mu\text{m}$ 宽) 组成，以防止由于处在陡的产生应力区有限电阻长度而引起的压力灵敏度降低 [1]。在与压阻同样的离子注入工艺中在绕膜片边缘的厚环区，还制作了其它包括 R_G 的外围元件。因此，它们对膜片上所加压力不敏感。用常见的硅 IC 工艺，在 P 阱中制作了 NMOS 运算放大器。

用联胺—水 ($\text{N}_2\text{H}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$) 各向异性腐蚀液形成面积为 1mm^2 的薄膜片区。此时片子正面淀积 SiO_2 ，并把背面 SiO_2 刻出图形，以作为腐蚀的保护掩膜。腐蚀是在 90°C 回流系统完成的，其腐蚀速率约为 $1.7 \mu\text{m}/\text{分}$ 。用腐蚀时间控制膜片厚度，使之约为 $30 \mu\text{m}$ 。用阳极焊 [14] 方法，把制好的片子粘在硼硅玻璃板 (柯于 7740) 上。由于这种玻璃具有几乎与硅相等的热膨胀系数，这就大大地减少了由于硅和封装管座之间热膨胀系数不匹配而产生的任何不希望应力。为了差压和计压测量，制备的玻璃板有许多 1mm 的压力入口孔。在把玻璃板和硅片装在对准架上之后，要把这些玻璃

板孔同硅片背面各向异性腐蚀的腔对准。然后在加热 450°C 条件下进行静电粘合,对硅片和玻璃板之间加 450V 电压至少 15 分钟,为了防止氧化,要在真空室内完成。对于测量绝对压力的传感器,类似地制备了无孔的玻璃板。在这种情况下,由于在真空室内粘合硅片与玻璃板,所以很容易在每个腐蚀空腔内形成了真空参考压力。

然后把粘有玻璃板的硅片划成芯片,并把每个芯片装在中心带有压力入口管的 $\text{TC}-5$ 管座上。最后把一个带有压力入口管的管帽密封在管座上。

图 5 示出了芯片顶视照片和截面图。一个芯片包括上面介绍过的信号调整器,它占有 $1/4$ 芯片面积。它还包括如图 6 所示的,用于全桥电路的常用检测放大调整器。因此,用单一的芯片可以表征两种类型的集成压力传感器。图 7 示出了封帽前组装的芯片。

4. 特性和讨论

通过实验,运算放大器仅可得到 50dB 的开环增益和 500kHz 单位增益带宽。平均输入失调电压可达 5mV ,其标准偏差为 3mV 。放大器在 $\pm 5\text{V}$ 电源电压下工作,功耗为 16mW 。为了表征压力传感器特性,在室温下,用 R_0 把放大器增益设定到 26dB 。

图 8 示出了输出电压和外加压力之间的关系曲线。在放大器输出端测得的压力灵敏度为 $700\text{mV}/\text{kg}/\text{cm}^2$ 。此值对应于 $\pm 5\text{V}$ 激励的压阻桥灵敏度为 $35\text{mV}/\text{kg}/\text{cm}^2$ 。测得这些器件的膜片厚度约为 $35\mu\text{m}$ 。所得到的这一灵敏度同用压力敏感器/传感器模拟器 (PRESENTS) [15] 的模拟结果取得了很好的一致,这种

模拟器的基础是考虑由有限长度电阻，硅弹性各向异性及锥形边支撑条件（比内建边缘条件支撑弱）造成灵敏度下降的有限元法。

如图 8 所示，在 2 kg/cm^2 范围内，放大器输出的终端线性误差小于满刻度的 0.3% 。由于受参考标准压力源限制，实验测得的滞后小于 0.1% 。

图 9 示出了典型的灵敏度的温度特性。在 $0-70^\circ\text{C}$ 范围内，桥的灵敏度温度系数为 $-1750 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$ ，经过补偿，在放大器输出端可得到小于 $+190 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$ 的结果。由于采用了比希望的 $8 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 浓度还低的杂质浓度造成了正的 R_G 电阻温度系数，所以出现了轻微的过补偿。此结果表明，用可变增益放大器可以成功地得到灵敏度的温度补偿。

在文献 [16] 中，介绍了包括用恒流源激励压阻桥电路的另一种补偿方法。在这种情况下，如果杂质浓度设定到合适值，例如 $8 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ，那么 $\pi_{G,G}$ 的温度系数可由桥组成电阻自身温度系数所补偿。但是，由于除了放大器集成之外，还必须对电流源集成，所以，对单块集成压力传感器来说，它不如本文报导的那种方法有吸引力。用我们的方法，用一个简单的电路就可以放大和补偿这个信号，从而降低了电路的复杂性和功耗。因此，这种方法很适合于集成传感器。

图 10 示出了在放大器输出端测得失调的温度特性。得到了整个热输出失调漂移小于 20 mV 。目前尚不清楚产生这样精确失调的机理。

5. 结 论

开发了一种MOS集成压力传感器。在压阻桥中灵敏度与温度的关系可用一个带有对温度敏感的片上反馈电阻的可变增益放大器予以很好地补偿。这种放大器电路还可用于要求热补偿和低功耗的其它传感器中。

致 谢 (略)

参考文献 (略)

C M O S 集成硅压力传感器

T. ISHARA, K. SUZUKI, S. SUWAZONO,

M. HIRATA, H. TANIGAWA

摘要——现已开发了第一个C M O S集成硅膜片压力传感器，它包括一个四臂压阻桥电路，一个放大器，和一个新设计的桥激励电路。用这个电路可以稳定由于温度和电源变化所引起的灵敏度变化。制作这种传感器采用了自对准双层多晶硅栅P阱C M O S工艺，同时，为形成薄的方形膜片采用了联氨的各向异性腐蚀的一种电化学自停腐蚀技术。制备好的膜片用静电粘附在玻璃片上使热应力减小到最小。在 $0-70^{\circ}\text{C}$ 温度范围和 $1\text{ V}/\text{kg}/\text{cm}^2$ 压力灵敏度下，得到了灵敏度漂移小于 $\pm 0.5\%$ ，失调漂移小于 $\pm 5\text{ mV}$ 的结果。利用一个新的激励技术，在电源电压变化 $\pm 10\%$ 情况下，灵敏度变化可达到小于 $\pm 1.5\%$ 。

I 引 言

根据压阻效应〔2〕，硅膜片式压力传感器〔1〕可把外加的流体压力转换为电信号。典型的传感器包括薄的硅膜片和通过把杂质扩散到膜片上形成的压阻标准电阻。这种类型传感器中，硅不仅用做扩散电阻的衬底，而且用做弹性材料。因为单晶硅有极好的弹性，甚至在加有静电压力时，都没有显著地出现蠕变和滞后。由于它的可靠性，硅膜片式压力传感器已被广泛用于汽车，医疗器械和工业设备领域。

最近，在这些领域中增加了微计算机应用，这也反映在对智能敏