

集成传感器文集

导论 附部分文集

第一分册

航空航天部七七一研究所

前 言

本文集是为771研究所着手开发研制集成传感器而匆匆收集汇编的。它包括导论、译文、调研、成果四个相对独立的部分。

导论附中文录是为介入集成传感器的研制必备的引导知识；译文专集主要代表目前国外传感器的发展水平，以便启发和借鉴；（暂缺）调研报告则是收集国内动态，主要是设计、研制和生产情况；本所研制成果包括研制经验的总结。

四部分有机组成，分集出版，以资各方面参考。

771所情报资料室

88. 8

集成传感器导论

目 录

- § 1 引 言
- § 2 集成传感器的物理基础
- § 3 集成传感器的性能指标
- § 4 压阻传感器的设计
- § 5 压阻传感器的结构
- § 6 其他传感器(略)

附：部分文录

- 1. 半导体压力传感器
- 2. 半导体压力传感器的特性及应用
- 3. 扩散硅压阻式压力传感器设计
- 4. 压力传感器新工艺及其动向
- 5. 带温度补偿电路的集成压力传感器
- 6. 研制高温半导体力敏传感器的几种途径
- 7. 兰宝石—硅膜的压阻效应
- 8. 硅压阻压力传感器的制造

9. 力敏元件及传感器文摘

10. 对航天用传感器的发展设想

Integrated Transducer

集成传感器导论

§ 1 引言

集成传感器 (Integrated transducer) 是用集成电路工艺和技术制造的微型、集成、智能化传感器。微型化已有苍蝇携带的窃听器；集成化已有把敏感元件、放大调制电路放在一起，作为整体接口；智能化则把传感器（五官）、计算机（大脑）、执行部件（手）作为一个完整的自动测控系统。在开发低等动植物，例如昆虫的特异功能基础上，传感器还将超过人类耳目的某些作用。宏观上，可观察上千光年的茫茫宇宙；微观上，可深入到 10^{-13} m 的粒子世界；时间上，可测知长达数十亿年的天体演化，短到 10^{-14} 秒的瞬态反应；并且在超温超压，强电磁场，核辐照的环境中，起到人类不能直接反映的作用。感知、运控、和执行部件将代替人类的五官、大脑和手，给人类带来前所未有的文明，被称为“第二次产业革命”。日本专家认为，本世纪是“器件时代”，下一世纪是“传感器时代”，传感器将会跃居到举足轻重的地位。就大系统论，整个雷达系统可看作一个传感器。谈到航天事业，“整个宇宙飞船就是高性能传感器的集合体”，例如“阿波罗 10”就有 8295 项测量参数要取自传感器。

集成电路的发展，给计算机技术带来了惊人的影响；集成电路的进步，也将促进传感器技术的突破。其实，上百年前已发现半导体的传感作用，例如 1879 年就发现了霍耳效应，比晶体管的发明

(1948年)早得多。但是迄今,传感器仍处于落后地步^{*},传感器涉及更为广泛的领域,具有更为突出的难点。传感器正在形成一门独立的学科——感知技术。

• 例如,目前工业生产的高精度测力传感器的技术水平:标准精度 0.1% ,零点误差 $\pm 1\%$,温度灵敏度 $\pm 0.15\%/100^{\circ}\text{C}$,温度零漂 $\pm 0.27\%/100^{\circ}\text{C}$,非线性 0.015% ,滞后 0.02% ,重复性 0.02% ,系统精度 0.5% 。

传感器,特别是集成传感器的定义,尚未形成固定的概念。基本上从物质、能量和信息角度给予规定,限制和分类。利用物质(材料)法则构成的传感器,谓“物理型”传感器,利用场(能量)法则构成的传感器,谓“构造型”传感器,利用信息法则构成的传感器,谓“智能型”传感器。集成传感器可能是三种类型中的任何一种,目前阶段,集成传感器主要属于“物理型”传感器。

传感器的最高顶峰,可能会仿效人类的特异功能。这是一个全新的未知的领域。美国中央情报局,利用“千里眼”人描绘“迪戈加西岛”上的秘密军事基地,结果比卫星照片还清楚;利用特异功能意念控制,结果使远方计算机的操作失常。作为遥感传感器,当然也应当起到“千里眼”、“顺风耳”的作用。

§ 2 集成传感器的物理基础

物理型传感器可看作一个“静态平衡”的热力学系统。按照热力学第二定律,弹性固体系统内能的变化为外界吸收的热和外界对系统所作的功之和。即:

$$du = T ds + \sum_i X_i dw_i \quad (1)$$

式中, T 为温度, S 为熵, X_i 为示量变量, w_i 为示强变量。据此, 可得到物质单晶内能的变换式:

$$G = U - TS - \sum_i \pi_i - E_m D_m - H_m B_m \quad (2)$$

式中, G 为可做功的自由能, TS 为过程中产生的热, Σ 为力, π 为位移, $\Sigma\pi$ 表示机械能, E 为电场强度, D 为电位移, 故 ED 为电能, H 为磁场强度, B 为磁感应密度, HB 为磁能。考虑晶体各向异性, 上述几种能量全是矢量。在准静态变化过程中:

$$dG = -SdT - \sum_i d\pi_i - D_m dE_m - B_m dH_m \quad (3)$$

进一步能得到力 (Σ_i), 电 (位移 D_m), 磁 (感应密度 B_m) 等量及一系列物理常数。正是物质法则中的各物质常数, 建立起示量变量和示强变量之间的能量关系, 从而构成物性型传感器的基础。

类似的分析步骤, 也可得到压电传感器的基础方程:

$$\begin{aligned} \Sigma &= S^E \pi + d_1 E \\ D &= d_1 \pi + \epsilon \pi E \end{aligned} \quad (4)$$

即在忽略磁场和温度的影响情况下, 压电晶体中的内能仅由机械能和电能两部分组成。

自然界存在着各种效应, 常用的有上百种, 还有许多尚未被发现的效应。例如, 根据“效应周期表”, 在热、电、磁三种能量之间, 就可能存在 54 种相关效应, 目前被发现和应用的只有 17 种。显然, 就传感器的物理基础而言, 是一个尚未完全开发的广阔领域。

从实用角度出发, 可把传感器看作一个四端网络, 设 $\bar{x}_1$ 为输入

示强变量, X_1 为输入示强变量, X_2 为输出示强变量, X_3 为输出示强变量。根据网络关系, 有:

$$\begin{aligned} X_1 &= Y_{12} \bar{X}_2 + Y_{13} \bar{X}_3 \\ X_2 &= Y_{21} \bar{X}_1 + Y_{23} \bar{X}_3 \end{aligned} \quad (5)$$

式中, Y_{12} , Y_{21} , Y_{13} , Y_{23} 为四端网络传输参数。在不含源情况下, $Y_{12} = Y_{21}$, 利用网络技术, 还可以建立一系列描述传感器特性的数学形式。

对于构造型传感器, 因为含有外部能源, 可视作一个“广义放大器”, 构成包括外部能源输入的六端系统, 需要有传递比, 接收比, 隔离比等 9 个特征系数。

对于智能型传感器, 见后面图-10。

§ 3 传感器的性能指标

考虑环境等因素后, 传感器是一个复杂的输入输出系统, 见图-4。主要输入 X 和输出 Y 之间有下列关系:

$$Y = (a_0 + a_1 X + a_2 X^2 + \dots + a_n X^n) X \quad (6)$$

在理想状态下, 高次项为 0, 则 $Y = a_0 X$, 即输入输出保持严格的线性关系。实际上, 由于滞后, 蠕变, 振动及温度, 电磁场等各项干扰的影响, 使输入输出特性恶化。由于传感器是个多变量系统, 理想探讨是有限的。实际也未形成统一的标准性能指标, 通常是罗列基本参数和主要环境指标, 作为制造、检验和使用的依据。

如上所述，多数传感器的输入输出特性近似呈线性关系。但是在计算静态性能之前，必须对特性曲线进行拟合。常用拟合方法有：端点法、平移端点法、平均斜率法、平均选点法、最小二乘法等。

关于精度的计算，常用分指标法和综合精度法。前者认为传感器的精度 A_0 可由非线性 $\delta_L = \frac{\Delta L_{max}}{\hat{y}_{FS}} \times 100\%$ ，滞后 $\delta_H = \frac{1}{2} \frac{\sigma_{Hm}}{\hat{y}_{FS}} \times 100\%$ 和重复性 $\delta_R = 1 \frac{\sigma}{\hat{y}_{FS}} \times 100\%$ ，综合而成。即

$$A_0 = \pm \sqrt{\delta_L^2 + \delta_H^2 + \delta_R^2} \quad (7)$$

式中， ΔL_{max} 为标准与拟合直线间的最大偏差； ΔH_m 为同一测量点正反行程最大偏差； $\hat{y}_{FS}$ 为满量程； σ 为全部标准数据与其相应行程残差的标准偏差平均值。当采用综合精度法时，则

$$A = \pm \frac{2\sigma}{\hat{y}_{FS}} \times 100\% \quad (8)$$

式中，用欠塞尔公司求出的标准偏差 $\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n \epsilon_i^2}$ ，

ϵ_i 为校准数据对拟合直线的残差， n 为标准点总数。实际上，精度的计算比较复杂，常按各种推荐的标准进行计算。实际器件还须对性能进行各种补偿。

§ 4. 压阻传感器的设计

721 所正在研制压阻传感器。在静压下，掺杂半导体的迁移

率随压强而改变；沿轴拉伸或压缩时，能带结构发生变化，电子在能谷中转移，引起电导率变化。对于条形压阻单元，有：

$$\begin{aligned}\Delta R/R &= (1+2\mu) \frac{\Delta l}{l} + \frac{\Delta \rho}{\rho} \approx \Delta \rho / \rho \\ &= \pi \sigma = \pi E_{\varepsilon} = G_{\varepsilon}\end{aligned}\quad (9)$$

式中 σ —应力； ε —应变； π —压阻系数。因单晶的各向异性，P-Si 的 (111)、N-Si 的 (100) 晶向有最大的压阻效应； G —灵敏系数，与掺杂浓度有关； E —弹性模量； μ —泊松比。

当电阻元件同时受纵向和横向应力时，

$$\Delta R/R = \pi_r \sigma_r + \pi_t \sigma_t \quad (10)$$

式中， π_r 、 π_t 分别为纵向和横向压阻系数；

σ_r 、 σ_t 分别为纵向和横向应力。

采用硅杯一体结构，可增加强度，减小膜片与基座连接的困难。当膜片厚度 $h < 2a$ 直径时，可看作周边固定的圆形薄板。距中心为 r 的某点的切向和径向应力是 r^2 的函数：

$$\sigma_r = \frac{3P}{8h^2} [(1+\mu)a^2 - (3+\mu)r^2] \quad (11)$$

$$\sigma_t = \frac{3P}{8h^2} [(1+\mu)a^2 - (1+3\mu)r^2]$$

相应的应变为：

$$\varepsilon_r = \frac{3P(1-\mu^2)}{8Eh^2} [(1+\mu)a^2 - (3+\mu)r^2] \quad (12)$$

$$\varepsilon_t = \frac{3P(1-\mu^2)}{8Eh^2} [(1+\mu)a^2 - (1+3\mu)r^2]$$

根据上面的关系式，可绘出应力—应变图。可见，中心受拉边缘受压，且这两处的应力及应变为最大。根据计算，经向定位扩散压阻单元的电阻变化为：

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{3Pa^2}{16h^2} \pi_{44} \sin^2 \alpha (1+\mu) - \frac{m}{a^2} (3+\mu) - \frac{6m}{a^2} (1-\mu) \cos^2 \alpha \quad (13)$$

式中， $\Delta R/R$ 是电阻相对变化率； π_{44} 与材料掺杂浓度有关。当浓度为 $2 \times 10^{21} \sim 3 \times 10^{22} / \text{cm}^3$ 时， π_{44} 从 $30 \times 10^{-12} \text{ cm}^2 / \text{达因}$ 到 $120 \times 10^{-12} \text{ cm}^2 / \text{达因}$ ，近似呈线性变化， $m = r_2^2 + r_1^2 + \frac{1}{3}$ 。因为 $\Delta R/R = 2(\sin^2 \alpha, \sin^2 \alpha, \cos^2 \alpha)$ ，根据 P-Si(110) 晶面上的 $\Delta R/R$ 计算值，一种可选择的配置方式，如图 7 所示。此时，四臂桥阻的符号相反，灵敏度最大。在设计压阻传感器时，还要考虑量程、灵敏度非线性及因负频率特性等问题。

设计硅杯尺寸时，一种方法是使膜片边缘经向应力 $\sigma_{ar} < \text{硅的许用应力} [\sigma] = 550 \text{ kg/cm}^2$ ，得： $(\frac{3Pa^2}{4h^2})$

$$\frac{h}{a} \geq 3 \times 10^3 \sqrt{P} \quad (14)$$

再算出膜心挠度 w_0 对膜厚 h 的比值:

$$\frac{w_0}{h} = \frac{3(1-\mu^2)Pa^4}{16Eh^4} \quad (15)$$

此法的好处是不会超过材料的弹性极限, 缺点是小量程会出现较大的非线性。另一种方法是选定载荷因子, 例如 $\frac{Pa^4}{Eh^4} = 0.1$, 限定

$\frac{w_0}{h} < 0.3$, 得:

$$\frac{h}{a} = \sqrt[4]{\frac{P}{0.1E}} \quad (16)$$

此种方法, 不同量程对的 w_0/h 值一定, 非线性误差相同; 但若应力超过 $[\sigma]$ 时, 必须重新计算, 且载荷因子较小时, 会损失灵敏度, 最大应变值可按式验算:

$$\varepsilon_m = \frac{3P(1-\mu^2)}{4E} \left(\frac{a}{h}\right)^2 < 500\mu\varepsilon \quad (17)$$

硅杯形度 $\bar{R}$, 环宽 b , 支承环半径 R 及膜片半径 a , 系数 ϕ 应满足:

$$R \geq 8 \sqrt{\frac{R^2 h^2 \phi}{(1-\mu^2)ab}} > 10h \quad (18)$$

用下式确定膜片固有频率 f_n :

$$f_n = 1.57 \sqrt{\frac{Eh^3}{12a^4 p(1-\mu^2)}} \quad (19)$$

一般选用压敏电阻条宽为数微米到数百 μm 的 π 形结构。这样, 制板简单、便于布局, 散热性好, 成品一致性好。

§ 5 压阻传感器的结构

总体结构应保证应用需要和原器件特性。

在常用结构中，(a)硬件固定，结构简单，但硅杯易受外界影响。(b)弹性组装，增加了橡皮圈，避免了安装应力 and 热胀不均性影响，提高了静态精度。(c)悬浮支柱，结构性能好，但要考虑“匹配封装”，确保气密性好，连接强度高。硅杯与基座使用胶粘法，低熔料焊接，金硅共熔，静电焊接，低熔玻璃熔接方法，进行“匹配封装”。此外，为了耐腐蚀，耐高温，还要求一些特殊结构，如介质隔离型，多晶硅基底型，蓝宝石基底型及掺铍等品种。

高精新结构不断涌现出来，Motorola 的 MPX 型，采用不构成电桥的 X 型结构^(a)，沿轴施加电流，横向则产生正比于压力的输出信号。另有把通常悬臂结构，改进为 E 型簧片结构^(b)，提高了灵敏度，改善了线性和滞后特性。采用 E 型^(c)，进一步提高了线性度，并减少了温度的影响。还有使用应力集中的异形膜片，提高了灵敏度等。

尖端产品正在向微型化、有源化、数字化和智能化方向发展。图 10。作为微型化的一个代表，图 11(a)，在数微米膜片上扩散成纵横两种压敏电阻。采用石英玻璃封装，氟塑料引线，做成环氧树脂填充的结构。作为有源化的代表(b)，把敏感、变换、放大、补偿调整及电源，混合集成一种标准化元件，……总之，集成传感器虽小，其制不好。但其制造却涉及到整个电子学成果，特别需要微细加工和精密测量等前沿技术。

§ 6 其他传感器 (略)

温度传感器

化学量传感器

光传感器

由此导论可知,集成传感器包括了内容丰富的内涵和涉及广泛的外延,是一门独立的学科。开发工作需要较高的人员素质和工具条件。但是只要坚持研究,成功是有望的。

宋士林

半导体压力传感器

1. 序言

最近，以半导体传感器为中心的新型传感器的大量研制，以及这些新型传感器的应用，使精度更高、稳定性好的工业用测量仪器已商品化。作为这些测量仪器之一而广泛应用于测量流量、压力、液面、比重等方面的电子式差压变送器和电子式压力变送器（以下把两者总称为传感器），也都使用了新型传感器。

1968年日立制作所将金属应变计作为传感器使用的直接转换式传感器，即开环式传感器商品化。而后，在直接转换技术基础上，使用扩散型半导体应变计的新型传感器“SG传感器”，也于1978年开始出售。

这种传感器是硅薄膜压力传感器。它具有很多优良特性，但也存在因非线性误差而难于实现高精度化的问题。因此，要应用于高精度传感器，就要解决非线性误差问题。然而，为了定量地掌握非线性误差，通过大量的实验和分析，寻求有关压阻特性的新的公式。从公式得知，传感器的非线性误差和灵敏度，由应变计的配置来决定。基于这一点，设计出非线性误差最小的最佳应变计图形，研制了精度为 ± 0.2 以上的半导体压力传感器。

然而，这种半导体压力传感器，在低压范围和承受压反两方面的压力的情况下进行高精度测量，也会产生不可忽略的非线性误差。这种非线性误差，是由硅膜片的挠曲过大所导致的非线性和压力方向不同使应力分布不对称而引起的。因此，为防止挠曲过大和改进

应力分布的不对称性。研制出中间具有圆形刚体的半导体压力传感器。从而高精度地测量低压和以前无法测量的正反两方向的压力。

2. 半导体压力传感器

2.1 半导体应变计

硅一类的半导体具有压阻效应，因而产生应变时其阻值就产生很大变化，所谓压阻效应，指的就是当产生应变时，使晶格间隔发生变化，从而使载流子的移动性发生变化的这种特性。

随应变计的应变而产生的电阻变化，通常以下式表示：

$$\frac{\Delta R}{R} = G_F \cdot \varepsilon = \left\{ (1 + 2\nu) + \frac{\Delta \delta}{\delta} \right\} \cdot \varepsilon$$

.....(1)

R ：初期电阻值

ΔR ：由应变而产生的电阻变化量

G_F ：应变率（应变计的灵敏度）

ε ：应变

ν ：泊松比

δ ：初期电阻率

$\Delta \delta$ ：应变引起的电阻率变化量

等式(1)右边的前一项是电阻的形状变化，后一项是电阻率的变化。金属应变计可忽略电阻率变化，故 $G_F \approx 2$ 。但是，半导体应变计由于压阻效应，使电阻率的变化很大，其灵敏度非常高，

可达 $G_T \approx 100 \sim 150$ 。

2.2 半导体压力传感器的优点

用于SG传感器的半导体压力传感器。是硅薄膜形压力传感器。它是由单晶硅制成应变片。在其表面上用扩散法制成半导体应变电阻。

图1为半导体压力传感器的基本结构图。在半导体压力传感器表面上。具有图2结构的扩散形半导体应变电阻组合成4个惠斯登电桥。传感器内侧做成凹形。硅薄膜就是应变片。

对传感器施加压力。硅膜就变形。表面上的应变电阻也会发生应变。因此。电阻因压阻效应而发生变化。在电桥上产生与压力成比例的电输出。

该半导体压力传感器具有下列优点：

(1) 灵敏度高

因为是压阻效应。所以灵敏度高（为金属应变计的50倍以上），放大部分简单，提高了可靠性。

(2) 重复性好

硅单晶是无滞后、无畸变、无疲劳的理想弹性材料。而且应变电阻就扩散在硅单晶，没有粘接部分。所以重复性非常好。

(3) 稳定

应变电阻是在1000℃以上的高温中扩散形成的。所以在使用温度为120℃的情况下。不存在老化现象。可以长期而又稳定地工作。另外。其制造工艺与集成电路相同。所以可直接运用稳定而可靠的IC技术。