

集成传感器

鲍敏杭 吴宪平 编著

国防工业出版社



集成传感器

鲍敏杭 吴宪平 编著

国防工业出版社

内 容 简 介

本书介绍半导体集成传感器的工作原理、器件结构和基本应用知识,主要介绍磁敏、力敏、光敏(图象)、热敏和化学敏的集成器件(敏感器件与信号处理电路的集成或多个敏感器件的集成),也介绍了一些用集成电路工艺制作的正在向集成化方向发展的器件。本书内容注重实际,反映了国内外发展的新成果和新动向。本书可供从事仪器仪表、工业自动化等工作的工程技术人员、半导体器件研制人员、高等院校有关专业的师生参考。

集成传感器

鲍敏杭 吴亮平 编著

新华书店北京发行所发行

北京市昌平长城印刷厂印刷

787×1092 1/32

印张7 1/2

1987年12月第一版

1987年12月第一次印刷

印数: 0,001—7,000册

ISBN7-118-00144-9/TP16 定价: 1.55元

前 言

大规模集成电路技术的迅速发展，普及了计算机的应用。在仪器仪表、工业自动化、航天技术和武器系统等方面，计算机都日益成为不可缺少的部分。但是，计算机仅仅是一种信息处理机，如果没有多种多样、性能优良的传感器为它提供大量可靠的信息，那末计算机的作用就会受到很大的限制。实际上，目前计算机的迅速普及已使传感器相对地落后了，出现了所谓“头脑（计算机）发达，感官（传感器）落后”的局面。因此，近年来国内外普遍把传感器列为八十年代优先发展的领域之一。

为适应计算机的需要，传感器的一个重要发展趋势是从结构型器件向固态传感器发展。因为固态传感器能输出易于处理、也易于被计算机接受的电信号。而固态传感器中又尤以利用半导体硅制作的传感器最引人注目。这不仅因为人们对硅的性质了解得最彻底，硅器件的加工技术最成熟，也因为硅传感器与集成电路的工艺相容性好，有可能把更多的器件（敏感器件或电路器件）集成在同一芯片上或封装在一起，构成集成传感器，使传感器具有更好的性能或更多的功能，甚至可把敏感器件、信号处理电路直至微处理器都集成在一起，构成高级的集成传感器——“智能”传感器。

近年来已有不少集成传感器问世，并在继续迅速发展，成为传感器领域中最先进、最活跃的部分，代表了传感器发展的水平和方向。在国内，集成传感器的研究、制造和应用

的领域也不断扩大，越来越多的人接触到这一类新型的传感器，迫切希望对它有更深入的了解。为此，作者在自己科研和教学工作的基础上，参考国内外有关资料，撰写了这一本介绍集成传感器的书，系统地介绍各种类型的集成传感器的基本原理、结构和应用知识，供从事传感器研究、制造和应用工作的读者参考。并希望能起到抛砖引玉的作用，导致更多更好的专著出现。

由于作者学识有限，书中缺点错误难免，欢迎广大读者批评指正。

目 录

第一章 传感器和集成传感器

§ 1 信息系统中的传感器	1
§ 2 传感器的种类	4
§ 3 大规模集成电路及其对传感器的影响	6
§ 4 集成传感器	8

第二章 集成磁传感器

§ 1 霍尔效应和霍尔传感器	15
§ 1.1 霍尔效应的基本原理	15
§ 1.2 霍尔器件的几何效应	20
§ 1.3 霍尔器件的最大输出电压和功率	22
§ 2 集成霍尔传感器	24
§ 2.1 开关型集成霍尔传感器	25
§ 2.2 线性集成霍尔传感器	32
§ 3 集成霍尔传感器中的霍尔元件	35
§ 3.1 集成电路中霍尔器件的特点	35
§ 3.2 霍尔器件的设计考虑	38
§ 4 集成霍尔传感器的应用	41
§ 4.1 开关型集成霍尔传感器的应用	41
§ 4.2 线性集成霍尔传感器的应用	48
§ 5 其他磁敏半导体传感器	54
§ 5.1 磁敏MOS霍尔器件	54
§ 5.2 磁阻器件	57

第三章 集成压力传感器

§ 1 压力传感器的半导体化	61
§ 2 半导体的压阻效应	63
§ 2.1 压阻效应	63
§ 2.2 压阻系数	64
§ 3 压敏电阻电桥	69

§ 3.1 压敏电阻电桥的基本特性	69
§ 3.2 压敏电阻电桥和膜的常见设计	71
§ 3.3 压敏电阻电桥特性及补偿	76
§ 4 压阻式集成压力传感器及其应用	86
§ 4.1 带补偿电路的压力传感器	86
§ 4.2 带放大电路的集成压力传感器	88
§ 4.3 频率输出型的单块集成压力传感器	92
§ 4.4 压力传感器应用中的常用电路	94
§ 5 电容式集成压力传感器	97
§ 5.1 压力敏感电容器	97
§ 5.2 电容式集成压力传感器	100
§ 6 MOSFET压敏器件	105

第四章 集成温度传感器

§ 1 集成温度传感器的基本原理	110
§ 1.1 晶体二极管正向压降的温度系数	110
§ 1.2 用晶体三极管作温度传感元件	112
§ 2 电流型集成温度传感器及其应用	118
§ 2.1 电流型集成温度传感器之一	119
§ 2.2 电流型集成温度传感器之二	128
§ 3 电压型集成温度传感器	134
§ 3.1 稳压管式集成温度传感器	134
§ 3.2 电压输出型集成温度传感器	140
§ 4 实用温标的集成温度传感器	144
§ 4.1 电流输出型实用温标的集成温度传感器	144
§ 4.2 电压输出型摄氏温标集成温度传感器	150

第五章 光传感器

§ 1 半导体的光敏性	152
§ 1.1 光电导效应	152
§ 1.2 光敏二极管效应	154
§ 1.3 光生伏特效应	155
§ 2 光敏三极管及其集成器件	157
§ 2.1 光敏三极管原理	157
§ 2.2 光敏晶体管的光谱响应	160
§ 2.3 光敏晶体管的应用电路举例	161
§ 2.4 光敏晶体管构成的集成器件	163

§ 3 半导体色敏传感器	167
§ 3.1 硅色敏传感器原理	167
§ 3.2 色敏器件的工艺特点	172
§ 4 电荷耦合器件像传感器	174
§ 4.1 电荷耦合器件基本原理	174
§ 4.2 电荷耦合像传感器	185

第六章 离子敏感和气体敏感的化学传感器

§ 1 离子敏感场效应晶体管	198
§ 1.1 MOSFET基本原理	198
§ 1.2 离子敏感场效应晶体管 (ISFET) 原理	200
§ 1.3 ISFET器件的结构和制造	206
§ 1.4 ISFET的测试和工作电路	207
§ 1.5 ISFET器件的特点	211
§ 1.6 集成ISFET传感器	212
§ 2 氢敏MOS场效应晶体管	216
§ 2.1 氢敏MOSFET器件原理	216
§ 2.2 氢敏钨栅MOSFET的分析和设计	218
§ 2.3 钨栅MOSFET器件的氢敏特性和应用	223
§ 3 其他结型半导体气敏传感器	224
§ 3.1 Pd—CdS肖特基二极管氢敏器件	224
§ 3.2 氢敏Pd—Si MIS器件	227

第一章 传感器和集成传感器

§ 1. 信息系统中的传感器

人通过自己的感觉器官可以感觉到温度、压力、图象、气味等各种形式的信息或信号。但是，人的感觉具有主观的因素，难以定量化。另外，人的感觉器官所能感受的信息的范围和灵敏度都有很大的局限性。人们为了更好地认识客观世界和改造客观世界，就创造了用以检测各种外界信息的元器件，这就是传感器。

传感器是一种通过把一种信号形式变换成另一种信号形式以实现信号检测的元器件。它的作用是与人的感觉器官类似的，但是它的感觉灵敏度和范围却可以大大地超过人的感官。例如，人们借助温度计可以以很高的精度测量从接近绝对零度直至高达几千度的温度；利用各种压力计可以测量从超高真空直到几万大气压的压力。温度计、压力计等都是人们制造的传感器件。

由此可见，传感器是随着人类社会的发展，早就出现的一种器件，它已经有了悠久的历史。但是近年来，传感器在工业生产、科学研究以及社会生活等领域中的作用有着转折性变化。随着微型电子计算机和微处理器控制技术的发展，能把现实世界中的各种信息变换成为电信号的传感器越来越成为关键性的器件。如果没有各种各样的传感器提供可靠而精确的信息的话，计算机或微处理器控制就根本无法实现。

因此，人们常把计算机比作人的大脑，而把传感器比作人的眼、耳、口、舌、鼻等感觉器官。目前，多功能的微型计算机已大量生产并广泛地使用，而传感器则处于相对落后的状态，出现了“头脑（计算机）发达，感觉（传感器）落后”的局面。这使得传感器的地位显得更为突出，被普遍认为是八十年代科学研究和技术发展的一个重大方面。为了对传感器的重要性有一个基本的了解，我们还必须从信息系统的角度来看问题。

在信息处理器未出现时，信息的读取、信息的分析处理和根据信息进行的控制，都是由人分别进行的。例如，人从温度计、压力计等传感器的指示上读出某反应器内的温度、压力等数据信号，然后，根据这些数据，通过人的分析，对反应器内反应的进行情况作出判断，再通过人工调节改变反应室的温度、压力等参数。在这种情况下，传感器只要对被测量作出反应，把它变换成诸如液柱面高低，指针的偏转角度等机械指示，以供人进行读数就可以了。这种信息系统的内部关系可以由图 1-1 来表示。

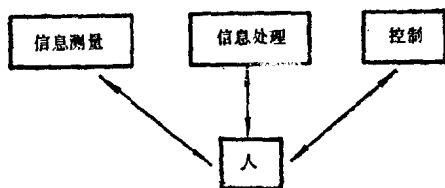


图1-1 传统的信息测量控制关系

随着电子技术的发展，出现了各种信息自动处理器。特别是电子计算机是一种十分强有力的信息处理器。由于计算机功能强大，为了充分发挥它的潜力，一台计算机可以同时为

许多用户进行信息处理，其关系如图 1-2 所示。

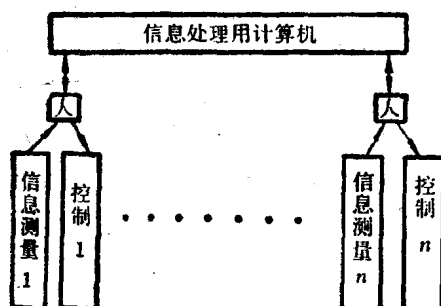


图1-2 计算机用于信息处理的情况

近几年来，随微电子技术迅速的发展，微型电子计算机和微处理器的产量不断增加，成本下降，这促使了信息处理器的专用化。就是说，一台微型机仅用于一台小型设备的控制，它接受有关这一设备状态的信息，加以处理并实现自动控制。图 1-3 是一个微型计算机用于汽车自动控制的控制系统(1)，即所谓 CCC (Computer Control Command) 汽车控制系统。

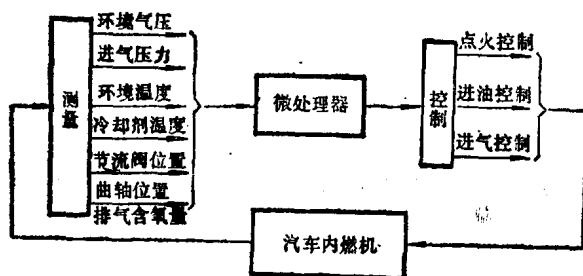


图1-3 用微处理器实现汽车的自动控制

因为信息处理器一般只接受电信号（数字或模拟信号）。而被测量一般有光（辐射）、磁、力、热、化学和电等六种

形式。除了被测量本身就是电信号的情况之外，需要有一个输入变换器把被测的量转变成为电学量。同样，也需要有一个输出变换器，它的作用除了要把输出信号功率放大之外，有时还要把输出电信号转换成为光、磁、力、热等不同形式的驱动信号。在这种情况下，我们把能将光、磁、力、热或化学参数转换成电学量的输入变换器称为传感器；而能把电学量功率放大或变换成光、磁、力、热等输出信号的输出变换器称为激励器⁽²⁾，如图1-4所示。

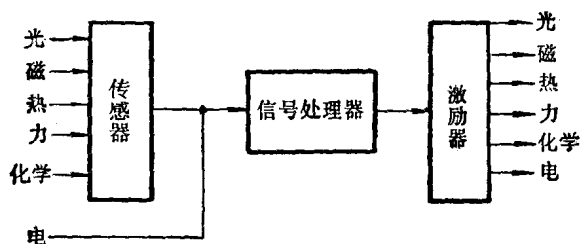


图1-4 传感器和激励器

这里我们需要说明一下，从一般的意义上讲，信号处理器不一定是微处理器，它可以是其他电子处理系统（数字的、模拟的或数字模拟混合的）。另外，信号处理器的工作信号也不一定限于电信号，它也可以把电信号变换成光信号或声信号，对光信号或声信号进行处理后再变回到电信号（如光处理器的情况）。原则上讲各种信号形式都可以作为信号处理器的工作信号。但是实际上，目前使用最广、影响最大的信息处理器是以电信号为工作信号的微处理器。

§ 2. 传感器的种类

从前面的讨论我们可以看到，从传感器对不同的能量进

行变换的功能来讲，它可以分成五大类，即光（辐射）传感器、磁传感器、温度传感器、力传感器（压力、加速度等）和化学传感器。这五类传感器中的前面四类又统称为物理传感器，以与化学传感器相对应。

根据传感器工作原理的不同，一般又可以分为结构型传感器和物性型传感器两类。结构型传感器是利用弹性膜、弹性管、双金属片、电容器、电感等结构型元件进行测量的，如压力表头就是一种典型的结构型传感器。物性型传感器则是利用一些材料的物理特性或固体元件的参数变化来实现检测的，一般在测量时没有宏观的物体位移。因此物性型传感器也常被称为固体传感器。因为物性型传感器除具有小型、反应速度快、寿命长和便于批量生产等优点之外，它的输出通常就是电学量，最适于与信号处理电路配合应用。固体传感器中有一大类是利用半导体材料和器件制造的传感器，这种传感器很便于利用目前迅速发展的集成电路工艺技术，也便于与集成电路结合在一起，构成所谓“集成传感器”，因此它是目前传感器研究发展工作最活跃和最集中的领域。

另外，从能量来源来区分，传感器又可分为无源传感器和有源传感器二类。所谓无源传感器，是指不需要辅助能源就能把一种形式的信号变换成为电信号输出的传感器，诸如热电偶、光电池等就是无源传感器。但是有的传感器工作时需要一定的辅助能源才能进行信号变换，这样的传感器就是有源传感器。例如热敏电阻就是一种有源传感器，因为它的电阻随温度的变化一定要通过外加电源才能变换成电流或电压信号。

除了上述一些分类方法之外，还可以根据传感器对信号的检测转换过程把传感器分为直接转换型和间接转换型。如

光电二极管直接把光信号转换成电信号，热电偶直接把温差变成电信号输出。光、温度等就属于直接转换信号，光电二极管和热电偶就是直接转换型传感器。另外，有一些信号则要通过适当的方法间接地被转换成电信号。例如流体的流速可以通过测量两点的压差得到，物体的位移可先变换成为光信号或磁信号然后再行检出。这样，流速或位移就是间接转换信号，而相应的传感器就称为间接转换型传感器。

§ 3. 大规模集成电路及其对传感器的影响^[3]

半导体集成电路从诞生到现在才二十余年的历史。二十余年来，集成电路持续高速的发展在人类科学技术发展史上是空前的。在一块硅片上器件集成的密度基本上是以每年翻一番的速率增长，使集成电路经历了小规模集成电路（SSI），中规模集成电路（MSI）和大规模集成电路（LSI）的发展阶段，目前已发展到超大规模（VLSI）阶段并正向着甚大规模集成电路（ULSI）的方向发展。

大规模集成电路的发展和成熟，提供了大量价格便宜、使用方便的微处理器电路和存储器电路。用它们构成的微型计算机系统的功能，已超过十几年前的“大型”电子管或晶体管计算机的水平，而价格却已下降到一般家庭都能负担得起的程度。这一发展现实，在八十年代初引起了一场计算机应用革命，它表现在：计算机在企业管理、办公室的信息和文字处理、信息交换等方面的普及应用，它也表现在计算机系统在军事技术、工业自动化、机器人技术、自动测量和过程控制等方面的广泛应用。

大规模集成电路的发展，无论是大规模集成电路本身的技术进步还是由它引起的计算机应用革命，都对传感器的发

展起了巨大的促进作用，这主要表现在以下几个方面：

1) 功能强而价格低的计算机系统在各方面的广泛使用，特别在工业自动控制、机器人技术和自动检测等方面的应用，要求有大量精度高、尺寸小和价格便宜的传感器与之相适应。另外，在这些应用中，计算机往往要直接接收从传感器输出的信号，这就要求传感器的输出直接是电学量。原来占主导地位的结构型传感器就显得不能适应，促使了传感器向固体化、半导体化和集成化方向的发展。

2) 为了不断促进集成度的增长，集成电路的工艺技术有着日新月异的发展。目前的集成电路技术可提供高精度的细微加工技术，高密度的器件集成，制造工艺的严格一致性和高可靠性。这些技术和工艺为传感器制造工艺的革新提供了有力的手段。由于这些技术特别适应于许多固体传感器的制作，从而促使固体传感器得以较快地发展。

3) 集成电路的发展为制造传感器提供了许多成熟的材料。特别是半导体硅材料已能较自由地为人们所利用，它有许多适宜制造传感器的性质，并制成了实用的传感器。利用硅材料制作的半导体传感器，除了具有固体传感器的一般优点外，它还可以把一些集成电路与传感器制作在一起，构成所谓的传感器集成电路，或简称为集成传感器。除了硅之外，Ⅲ—Ⅴ族半导体也是制作传感器很有发展前途的材料。

由上述几点可见，集成电路的大规模化不仅对传感器提出了集成化的要求，也为传感器的集成化提供了应用基础和技术基础。反之，集成传感器的发展使大规模集成电路能更好地发挥出它的优越性，因而也促进了大规模集成电路的发展。

§ 4. 集成传感器⁽³⁾

根据第一节的说明, 我们知道传感器一般是指一个把光、磁、力、热或化学信息转换成电学信号的元件。这些元件的输出电信号要送到信息处理器作进一步的加工处理。随着集成电路技术的发展, 传感器可以和越来越多的信号处理电路制作在同一芯片上或封装在同一管壳内, 这就是集成传感器。由于集成传感器是一部分信号处理电路与传感器的集成, 因此它除了实现传感器的功能之外, 还可以完成一部分原来由信号处理器完成的功能。

传感器的集成化也是一个由低级到高级, 由简到繁的发展过程。在集成技术还不能把传感器和全部处理器电路集成在一起时, 人们总是先选择一些较基本、较简单而集成化后可以为传感器性能带来最大好处的电路, 先把它们和传感器集成在一起。这些被优先考虑的电路部分有:

1. 各种调节和补偿电路, 如电源电压调整电路、温度补偿电路等等。

把电源电压稳定电路和传感器集成在一起, 不仅降低了传感器对外部电源的要求, 使用起来方便了, 而且输出信号的稳定性也得到了改善。把温度补偿电路和传感器集成在一起更具有独特的好处。由于传感器的传感特性总有一定的温度灵敏性, 这在分立元件传感器的情况下, 对温度的补偿是通过外部感温元件的补偿电路。但由于传感器的实际温度和外部感温元件不能很好地跟随, 因此难以达到预期的效果。如果把温度补偿电路与传感元件集成在同一芯片上, 那么补偿电路就能很好地感知传感元件的温度, 可取得较好的补偿效果。由于温度灵敏性比较高是一般半导体传感器的主要

问题，因此良好的温度补偿更具有重要的意义。

2. 信号放大和阻抗变换电路

把信号放大电路和阻抗变换电路与传感元件集成在一起，对于改善信号的信噪比，克制外来干扰的影响有很大的好处。在没有集成时，传感器输出的电信号要经过传输线馈送到信号处理电路，如图 1-5 (a) 所示。传输线往往是噪声和干扰的一个来源，在传感器输出信号弱和传感器输出阻抗高的情况下，传输线上的干扰信号会对信号有很大的影响。在集成传感器中，由于把放大器和阻抗变换电路和传感元件集成在一起，传感元件产生的信号经放大和阻抗变换后再经过传输线馈送到后面的信息处理电路作进一步处理（如图 1-5 (b) 所示），因此，传输线上干扰的影响会被大大地削弱。关于这一点，我们可以用图 1-6 所示的等效电路加以说明。在图 1-6 中，传输线引进的噪声或干扰信号用一个等效电流源 I_N 和一个内阻为 Z_N 的等效电压源 V_N 来等效。根据这一等效电路，在信号处理器的输入端建立的噪声信号

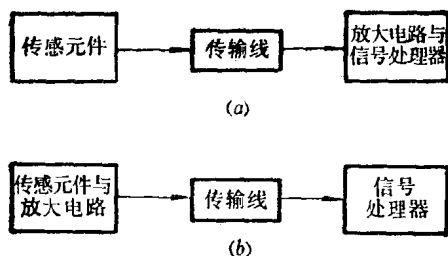


图 1-5 信号传输过程

(a) 分立传感器；(b) 集成传感器。