

传感器电子学

张福学 编著

国防工业出版社

传感器电子学

张福学 编著

国防工业出版社

内 容 简 介

本书深入系统地论述了传感器、传感器材料、传感器信号处理和传感器应用,是我国第一部全面论述传感器电子学的专著。全书共五编,计三十二章。第一编共三章,简述了传感器的意义、作用、发展动向等,较详细地论述了传感器智能化、静态和动态性能。第二编共四章,简述了传感器材料的设计与应用,较详细地论述了陶瓷、有机和半导体传感器材料。第三编共八章,论述了各种传感器的原理、结构和性能。第四编共六章,论述了传感器电路的噪声、传感器的模拟和数字信号处理、微处理机在信号处理中的应用,以及信号处理的设计例。第五编共十一章,论述传感器在不同领域中的应用及传感器应用系统。

本书可供研究、生产和应用传感器的科技人员参考,亦可用作高等院校光学、磁学、声学、压电铁电学、生物医学、固体物理、计算机应用、仪器仪表与测量、自动控制、惯性技术、电子材料与元器件、无线电技术等专业的研究生和本科生教学用书。

传 感 器 电 子 学

chuán gǎn qì diàn zì xué

张 福 学 编 著

责任编辑 崔士义

*

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路23号)

(邮政编码 100044)

新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

*

787×1092 1/16 印张33¹/₄ 777千字

1991年6月第一版 1991年6月北京第一次印刷 印数: 0001—3000册

ISBN 7-118-00788-9/TP·103 定价: 24.30元

作者简介

张福学 (1939—)

云南宣威人。1961年云南大学物理系毕业。历任电子工业部四川压电与声光技术研究所副所长、高级工程师。北京信息工程学院传感器电子学研究所所长、教授。南京航空学院兼职教授。四川省委和省政府科技顾问、北京市人民政府专业技术顾问。中国惯性技术学会第二届理事、国际电气电子工程师学会 (IEEE) 高级会员。全国总工会第十届执委。长期从事科学研究工作, 先后获国家发明奖和科技进步奖五项, 部委级科技进步奖十四项, 中、美、英发明专利八项。在国内外31种刊物上发表论文210篇。著有《压电学》、《可靠性工学》、《传感器电子学及其应用》、《压电铁电应用》、《压电晶体陀螺》、《压电晶体力和加速度传感器》、《传感器应用及其实用电路》等十一本书, 约750万字, 其中《压电学》(上下册) 评选为全国优秀科技图书。1978年全国科学大会授予“全国科技先进工作者”称号, 1979年国务院授予“全国劳动模范”称号, 1984年国家人事部授予国家级“中青年有突出贡献专家”称号。被编入《中国人名词典》、《中国科技人物辞典》和《中国工程师名人大全》。

目 录

第一编 概 论		第七章 半导体传感器材料89
第一章 传感器概述1		§ 7.1 半导体的基本物性89
§ 1.1 传感器的重要性1		§ 7.2 半导体器件的工作原理94
§ 1.2 传感器的作用、定义和分类1		§ 7.3 半导体传感器的特性与工艺 技术98
§ 1.3 物理、化学和生物传感器2		
§ 1.4 传感器的技术动向4		第三编 传 感 器
§ 1.5 传感器的需求动向9		
§ 1.6 传感器的研究与开发11		第八章 光传感器100
第二章 传感器的智能化14		§ 8.1 内光电效应型光传感器100
§ 2.1 智能化的必要性14		§ 8.2 外光电效应型光传感器106
§ 2.2 智能化的阶段与技术途径15		§ 8.3 热电型光传感器106
§ 2.3 智能化的现状16		§ 8.4 二维光传感器107
§ 2.4 材料和结构的信息处理智能化21		第九章 光纤传感器112
§ 2.5 传感器的未来22		§ 9.1 概述112
第三章 传感器的静态和动态特性24		§ 9.2 光纤的结构及其传输原理112
§ 3.1 传感器的静态特性24		§ 9.3 光纤的性能与类型114
§ 3.2 传感器的动态特性29		§ 9.4 光纤温度传感器117
§ 3.3 系统 τ 、 ζ 和 ω_n 的阶跃测定法37		§ 9.5 光纤压力和振动传感器118
		§ 9.6 光纤位移传感器121
		§ 9.7 光纤陀螺122
第二编 传感器材料		§ 9.8 光纤形变传感器125
第四章 传感器材料概论40		§ 9.9 光纤速度和流速传感器126
§ 4.1 传感器技术与材料技术40		§ 9.10 光纤加速度传感器127
§ 4.2 传感器材料的必要条件43		§ 9.11 光纤声传感器130
§ 4.3 传感器材料的设计44		§ 9.12 光纤磁传感器132
§ 4.4 传感器材料的应用48		§ 9.13 光纤电压和电流传感器135
第五章 陶瓷传感器材料61		§ 9.14 光纤电磁场传感器138
§ 5.1 传感器用陶瓷材料的化学性质51		§ 9.15 光纤射线传感器141
§ 5.2 传感器用陶瓷材料的物理性质63		§ 9.16 光纤分光传感器143
§ 5.3 各种传感器用陶瓷材料68		§ 9.17 光纤折射率传感器144
§ 5.4 陶瓷敏感元件的集成化与多功 能化77		第十章 热敏传感器146
第六章 有机传感器材料80		§ 10.1 热敏传感器的分类及特性146
§ 6.1 有机敏感材料的种类80		§ 10.2 热膨胀型热敏传感器148
§ 6.2 有机热敏元件81		§ 10.3 热电动势型热敏传感器150
§ 6.3 有机力敏元件82		§ 10.4 电阻值变化型热敏传感器151
§ 6.4 化学敏元件84		§ 10.5 电容量变化型热敏传感器152
		§ 10.6 铁氧体型热敏传感器153

§ 10.7	压电型热敏传感器	154
§ 10.8	热释电型热敏传感器	156
§ 10.9	晶体管型热敏传感器	157
§ 10.10	其它热敏传感器	157
第十一章	磁敏传感器	159
§ 11.1	概述	159
§ 11.2	霍尔器件	159
§ 11.3	磁阻器件	164
§ 11.4	SQUID器件	166
第十二章	压电射流陀螺等力敏传感器	170
§ 12.1	压电射流陀螺	170
§ 12.2	压力传感器	176
§ 12.3	应变片	180
§ 12.4	转矩传感器	182
§ 12.5	声传感器	184
§ 12.6	旋转传感器	186
§ 12.7	振动加速度传感器	187
§ 12.8	位置和位移传感器	190
第十三章	气敏传感器	193
§ 13.1	半导体气敏传感器	194
§ 13.2	固体电解质气敏传感器	201
§ 13.3	真空度传感器	204
§ 13.4	气体成分传感器	206
§ 13.5	高频式成分传感器	209
§ 13.6	光学式成分传感器	209
第十四章	湿敏传感器	212
§ 14.1	湿敏传感器的重要性	212
§ 14.2	各种湿敏传感器的优缺点	213
§ 14.3	湿敏传感器的分类	214
§ 14.4	水分子亲合力型湿敏传感器	215
§ 14.5	非水分子亲合力型湿敏传感器	223
第十五章	生物传感器的分类、原理和器件	226
§ 15.1	概述	226
§ 15.2	分类	226
§ 15.3	利用生物物质的生物传感器	227
§ 15.4	以生物系统为模型的生物传感器	230
§ 15.5	以生物系统为对象的生物传感器	231

第四编 传感器的信号处理

第十六章	模拟信号处理	235
§ 16.1	运算放大器	235
§ 16.2	运算放大器的运算电路	239
§ 16.3	模拟滤波器	246
§ 16.4	A/D变换的预处理电路	259
第十七章	模拟信号和数字信号的转换	262
§ 17.1	模拟信号数字化	262
§ 17.2	A/D变换	269
第十八章	数字信号处理	278
§ 18.1	数字信号处理的基础	278
§ 18.2	数字滤波器的设计	289
§ 18.3	图像信号的处理	291
第十九章	微处理机在信息处理中的应用	306
§ 19.1	CPU(中央处理机)的组成	306
§ 19.2	半导体存储器	313
§ 19.3	输入输出接口	317
§ 19.4	微处理机的软件	321
§ 19.5	信号处理机实例	329
第二十章	传感器电路的噪声	333
§ 20.1	传感器电路的组成及噪声产生与感应模式	333
§ 20.2	噪声的种类和表示方法	334
§ 20.3	产生噪声的原因	335
§ 20.4	降低噪声的方法	337
第二十一章	信号处理系统的设计实例	339
§ 21.1	恒温槽的温度控制	339
§ 21.2	图像输入装置的设计	341
§ 21.3	图像处理中黑点的补偿方法	343
§ 21.4	白血球核小体抽出的例子	348

第五编 传感器的应用

第二十二章	机器人传感器系统	350
§ 22.1	机器人的构成及传感器的地位	350
§ 22.2	视觉传感器及其应用系统	351
§ 22.3	触觉传感器及其应用系统	357
§ 22.4	接近觉传感器及其应用系统	366

§ 22.5 听觉传感器系统	368	§ 27.1 安全防灾传感器系统的特点	434
第二十三章 传感器在汽车电子学中的 应用	371	§ 27.2 维护工程中传感器的任务	434
§ 23.1 概述	371	§ 27.3 安全用气敏传感器	435
§ 23.2 汽车电子学	371	§ 27.4 火灾传感器	440
§ 23.3 汽车发动机控制用传感器	373	§ 27.5 传感器系统实例	442
§ 23.4 非发动机用汽车传感器	383	§ 27.6 传感器防灾效果的统计评价	444
§ 23.5 公路交通系统用传感器	384	§ 27.7 安全防灾传感器的新课题	444
§ 23.6 讨论	386	第二十八章 传感器在过程工业控制 中的应用	446
第二十四章 传感器在航空航天中的 应用	387	§ 28.1 过程工业控制与传感器	446
§ 24.1 传感器在航空航天中的作用及其 特点	387	§ 28.2 热敏传感器	449
§ 24.2 陀螺仪	390	§ 28.3 流量传感器	457
§ 24.3 加速度传感器	391	§ 28.4 压力传感器	461
§ 24.4 转速传感器	393	§ 28.5 液面传感器	466
§ 24.5 压力传感器	394	§ 28.6 露点计	468
§ 24.6 高度传感器	395	第二十九章 节能系统与传感器	471
§ 24.7 空速传感器	396	§ 29.1 节能技术与传感器	471
§ 24.8 迎角和侧滑角传感器	397	§ 29.2 节能系统	473
§ 24.9 热敏传感器	398	§ 29.3 家庭和工业供热控制系统	475
§ 24.10 流量传感器	398	第三十章 光敏传感器的应用系统	482
§ 24.11 水平线传感器	399	§ 30.1 信息装置的功能	482
§ 24.12 阳光传感器	400	§ 30.2 输入系统的光敏传感器	482
§ 24.13 恒星传感器	401	§ 30.3 非实时和实时图像检测装置	484
第二十五章 传感器在医学中的 应用	402	§ 30.4 读出装置的光敏传感器	491
§ 25.1 医用传感器的特点、作用、分类和 动向	402	§ 30.5 光盘存储器和全息存储器	492
§ 25.2 传感器在循环系统中的应用	405	§ 30.6 光检测控制系统	495
§ 25.3 换能器在医学超声仪中的应用	413	第三十一章 遥感技术	498
§ 25.4 电化学传感器的应用	415	§ 31.1 遥感类型与电子型遥感系统	499
§ 25.5 生物传感器在医学中的应用	416	§ 31.2 应用领域	500
第二十六章 检测环境污染和公害的传 感器	419	§ 31.3 各种遥感器	501
§ 26.1 环境污染	419	§ 31.4 图像处理系统	508
§ 26.2 检测水质和大气污染	421	§ 31.5 利用数据的技术	509
§ 26.3 检测振动污染	427	第三十二章 验证声音、笔迹和指纹 等特征的传感系统	511
§ 26.4 检测噪声污染	430	§ 32.1 概论	511
§ 26.5 预防火山和地震的传感器技术	432	§ 32.2 说话人自动识别系统	511
第二十七章 安全防灾传感器系统	434	§ 32.3 手写签字自动核认系统	514
		§ 32.4 指纹自动识别系统	517
		§ 32.5 脸像自动识别系统	520
		参考文献	523

第一编 概 论

第一章 传感器概述

§ 1.1 传感器的重要性

发展科学技术的目的，一是用机器代替人的劳动，二是用机器做人不能做的事。人所从事的工作可分为三类，一是体力劳动，二是脑力劳动，三是体力劳动+脑力劳动。第一次产业革命即是试图用机器代替人进行体力劳动，如已逐步用汽车、火车、飞机代替人力车。第二次产业革命即是希望用机器代替人的脑力劳动，如当今用计算机代替人的大脑。今后的发展趋势即是用机器代替人进行体力劳动和脑力劳动，这种机器的代表即是发达国家正在研究的“智能机器人”。

体力劳动和脑力劳动可由人完成，亦可由机器完成，人与机器完成这种劳动的过程有图1所示的对应关系。人通过五官（视觉、听觉、触觉、嗅觉、味觉）接收外界信号，并将这些信号传送给大脑。大脑处理信号后，将执行命令传送给肌体。五官相当于传感器，大脑相当于电子计算机，肌体相当于执行器。

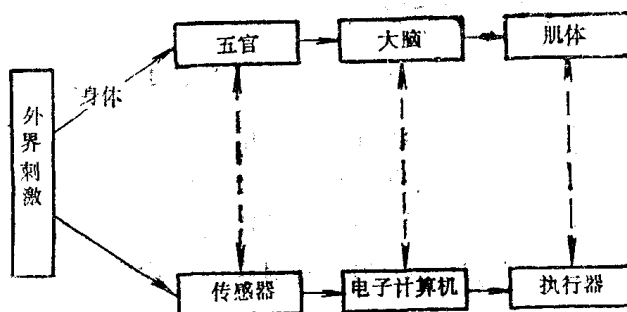


图1.1 人与机器的对应关系

由图1.1可看出，要使体力劳动和脑力劳动协调一致，则必须使传感器、电子计算机和执行器相互协调。当今，模拟大脑的电子计算机发展十分迅速，而模拟五官的传感器却发展甚慢。显然，不开发传感器，电子计算机就难于适应实际需要。因此，各国对传感器在信息社会中的作用有了新的认识和评价，传感器技术是高技术已无可非议。早在80年代，日本就将传感器技术列为十大技术之首，美国认为80年代是传感器时代，我国将传感器技术列为国家“八五”重点科技攻关项目之一。

§ 1.2 传感器的作用、定义和分类

1.2.1 传感器的作用

为了研究自然现象和制造劳动工具，人类仅靠五官获取外界信息还不够，故发明了能代替或补充五官功能的传感器。传感器的历史远比近代科学的历史悠久，天平自埃及王朝即开始使用，利用液体膨胀特性检测温度始于16世纪，19世纪奠定电磁学基础的法拉第物理法则仍是当今电磁传感器的工作原理。

对自然现象的定量认识，先要通过传感器获取信息（一次信息），然后通过处理获取的信息，从而弄清自然现象的本质。传感器在提高机器性能方面起了极大的作用，如将旋转速度变换为位移的传感器（离心调速机）能有效地控制蒸汽机车的速度。

以电量为输出的传感器虽然历史不长，但其发展迅速，目前只要谈到传感器，指的都是有电输出的传感器。由于集成电路技术和半导体应用技术的发展，传感器性能已大大提高，并在工业、矿山和医疗等领域得到了广泛应用。

1.2.2 传感器的定义

根据中华人民共和国国家标准（GB7665—87），传感器（transducer/sensor）的定义：“能感受规定的被测量并按照一定的规律转换成可用输出信号的器件或装置，通常由敏感元件和转换元件组成”。敏感元件（sensing element）指传感器中能直接感受（或响应）被测量的部分；转换元件（transduction element）指传感器中能将敏感元件感受（或响应）的被测量转换成适于传输和（或）测量的电信号部分。使输出为规定的标准信号的装置称变送器（transmitter）。

1.2.3 传感器的分类

传感器的分类法有多种，用得较多的分类法有两种，一是按将外界输入的信号变换为电信号采用的效应分类，二是按输出量分类。前者大致分为三类：利用物理效应进行变换的物理传感器；利用化学反应进行变换的化学传感器；利用生物效应进行变换的生物传感器。表 1.1 列出五官对应的传感器与效应。

表1.1 传感器采用的效应

感 觉	传 感 器	效 应
视觉（眼）	光敏传感器	物理效应
听觉（耳）	压力敏传感器、磁敏传感器	物理效应
触觉（皮肤）	压力敏传感器、热敏传感器	物理效应
嗅觉（鼻）	气敏传感器、热敏传感器	化学反应、生物效应
味觉（舌）	味敏传感器	化学反应、生物效应

能反映用户和生产厂家都关心的信息的传感器的分类方法，是根据输出量分类传感器。这种分类法可将传感器分为位移（线位移和角位移）、速度、角速度、加速度、力、力矩、压力、真空、流速、液面、温度、湿度、光、热、电压、电流、放射线、气体成分、浓度和粘度等传感器。

§ 1.3 物理、化学和生物传感器

1.3.1 物理传感器与化学传感器

光、声、磁等物理量容易处理，且这些物理量变换成的电信号也是物理量，故物理传感器较容易开发。另外，物理传感器开发也较早，因而较成熟。

化学物质的种类和浓度等化学量虽然可通过嗅觉、味觉来感知，但这类传感器还未开发。原因是，嗅觉、味觉传感器利用化学物质的哪些物理量或化学量，以及怎样将这些量转变成电信号，至今还不十分清楚。

化学传感器的检测量可按表 1.2 分类。化学传感器的作用机理较复杂，如吸附化学物质的传感器，属物理吸附还是化学吸附？若是化学吸附，那么，化学吸附的同时，是否伴随化学反应？这些都是极复杂的问题。

表1.2 化学传感器的检测量

检测量	物理量	(1) 检测物质的宏观物理量 (2) 检测物质的分子物理量 (3) 检测由于吸附化学物质而引起物理量的变化
	化学量	(1) 检测物质的宏观化学量 (2) 检测物质化学反应产生的量 (3) 检测传感器跟物质的化学反应、吸附导致化学量的变化

表 1.3 给出物理传感器与化学传感器的比较。由表中可看出，物理传感器起导电作用的主角是电子，而化学传感器起导电作用的主角是离子。电子仅一种，而离子种类繁多，故物理传感器简单，而化学传感器复杂多变。

表1.3 物理传感器与化学传感器的比较

比较项目 \ 传感器	物理传感器	化学传感器
主角	电 子	离 子
结构	简 单	复 杂
读出方法	数 字	模 拟
选择方法	容 易	困 难
检测绝对量	容 易	困 难
开发难易程度	较 容 易	较 困 难
展望	一 般	极 困 难

物理传感器由于电子仅存在“有”或“无”两种情况，故是数字式。化学传感器存在“有什么样离子”的问题，由于性质是连续变化，故是模拟式。例如，要使气敏传感器（化学传感器）有好的选择性十分困难，而数字（物理）传感器提高选择性比模拟（化学）传感器容易。

1.3.2 生物传感器

生物传感器能弥补上述化学传感器选择性（分辨率）差的缺陷。生物基础成分的蛋白质分子仅跟某种特定物质反应，例如，酶就是一种作为催化剂有选择地跟某种特定物质反应的蛋白质，利用酶的这种辨别能力，已开发了选择性好的酶传感器。

酶可由微生物提取，故亦可用微生物自身制成所谓微生物传感器。可用作生物传感器的有识别功能的物质有酶、微生物、动物或植物组织等。

§ 1.4 传感器的技术动向

传感器的技术动向，一是传感器本身的基础研究，二是跟微处理器组合在一起的传感器系统的研究。前者重点是研究新的传感器材料和工艺，后者将检测功能与信号处理技术相结合，向智能传感器发展。图1.2示出传感器技术基础与需求的关系，其中，关键是材料。

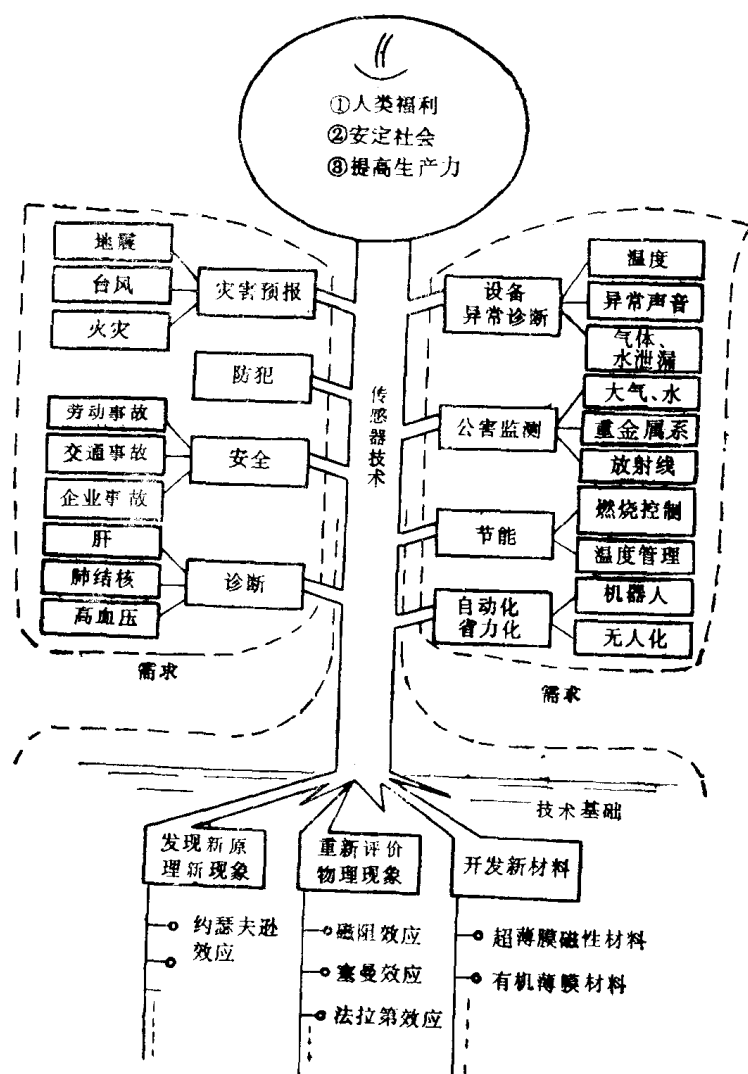


图1.2 传感器技术基础与需求的关系

1.4.1 发现新现象

重新认识压电效应、热释电现象、磁阻效应、……等物理现象，以及各种化学反应和生物效应，充分利用它们设计制造各种用途的传感器，这是传感器技术的重要基础工作。另一方面，开展发现新的物理现象、化学反应和生物效应的基础研究，利用新发现的各种现象、反应和效应则可扩大传感器的检测极限和领域，其意义极为深远。例如，利用核磁共振吸收的磁传感器能检测 10^{-7} 的地球磁场强度，利用约瑟夫逊效应的磁传感

器 (SQUID) 能检测 10^{-11} 的极弱磁场强度。又如, 利用约瑟夫逊效应式热噪声温度计, 能检测 10^{-6} K 的超低温。显然, 这种能检测极微弱信号的传感器技术能促进新技术的进一步发展, 甚至诞生一些新学科。

1.4.2 开发新材料

随着物理学和材料科学的进一步发展, 已有可能自由地控制能制造出来的材料成分。因此, 人们可设计制造出满足不同用途的材料, 其中最成熟、最先进的材料技术是以硅材料为主的半导体制造技术。

近年来, 人们设计制造的多功能精密陶瓷, 弥补了硅 (或锗) 半导体传感器温度上限低的缺点。例如, 陶瓷材料制作的气敏传感器工作温度很高, 可用于汽车发动机空燃比控制系统, 从而大大地扩展了使用范围。

钛酸钡半导体材料, 在相变温度以下, 其电阻率温度系数为负 (NTC), 在相变温度以上, 其电阻率温度系数为正 (PTC)。电阻率的温度系数和相变温度的大小受半导体材料组分与制造方法的支配, 图 1.3 示出几种半导体材料的特性曲线。

用电流加热 PTC 热敏电阻, 在相变温度点附近电流急剧减小, 故这种热敏电阻能在相变点附近自动保温, 可用于烫发吹风干燥器或衣物干燥器。若将钛酸钡中的钡 (Ba) 用铅 (Pb) 置换, 则相变温度下降到 70°C , 故可用于保温电饭锅。

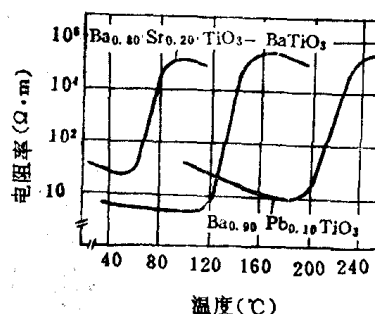


图1.3 PTC钛酸钡半导体的电阻率温度特性

1.4.3 发展微细加工技术

在硅集成电路基础上发展起来的工艺技术, 能将电路尺寸加工到光波长数量级, 且能批量生产超小型低成本传感器, 这种工艺技术称微细加工技术。该技术除全面继承氧化、光刻、扩散、淀积等微电子技术外, 还发展了平面电子工艺技术、各向异性腐蚀、固相键合工艺和机械切断技术。这四种技术都能进行三维形状的加工, 其中最重要的是前两种技术。固相键合工艺仅是将两个固态机械部件直接键合在一起的特殊技术, 机械切断技术只不过是机械加工方法, 将同一硅片上一次制作的多个传感器逐个分离切断的一种技术。

平面电子工艺技术是将硅单晶表面上生成的氧化膜作为一种掩膜, 在有掩膜的硅单晶上进行有空间选择的扩散和腐蚀加工。故平面电子工艺技术包括照相制版技术和化学汽相淀积技术等, 可以说它是集成电路加工技术中的基础技术。显然, 平面电子工艺技术是一种二维加工技术, 只能在跟表面垂直的方向加工数微米深度。

利用各向异性腐蚀技术, 即能对由平面电子工艺技术制作的氧化物掩膜和已扩散了杂质的半导体进行各向异性的化学腐蚀加工。不同的腐蚀液体, 在硅的结晶轴方向有不同的腐蚀速度 (也有各向同性的腐蚀液体)。有的腐蚀液体, 其对硅半导体的腐蚀速度随掺入硅中的杂质浓度不同而变化。例如, 氢氧化钾液体虽然对硅结晶轴有各向异性的腐蚀速度, 但对硅中扩散了硼的部位, 其腐蚀速度显著降低。利用腐蚀液体的这种性质, 则可在特定方向腐蚀掉硅晶体, 而在杂质扩散层处不腐蚀或减小腐蚀。因此, 利用各向

异性腐蚀技术, 可进行高精度的三维加工, 在硅片上构成孔、沟、棱锥、半球等各种形状的微型机械元件。例如, 将阀、弹簧、镜子、喷嘴、调节器, 以及力、压力、加速度和化学组分浓度等传感器制作在硅片上。利用微细加工技术, 能将分析气体的气体色谱仪那样复杂的敏感装置制作在硅片上。图 1.4 示出制作在 $\phi 50.8\text{mm}$ 硅片上的气体色谱仪结构图, 图 1.5 示出用腐蚀法加工在硅片上的气体色谱仪采样开关阀。将 5 个这样的色谱仪跟微型计算机组合在一起, 即构成便携式小型色谱仪。这种色谱仪不仅携带方便, 而且分析周期可缩短到 1 min 以下。

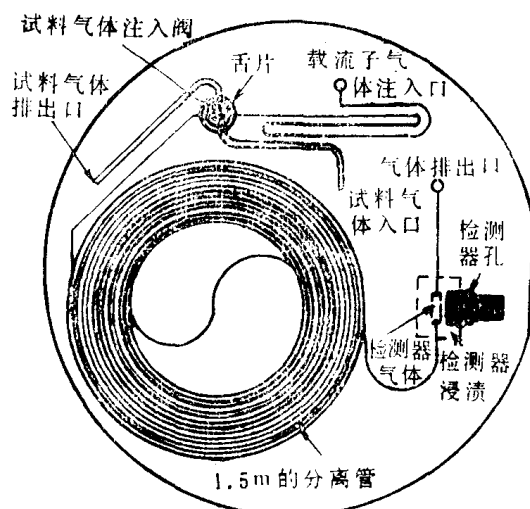


图1.4 气体色谱仪的结构

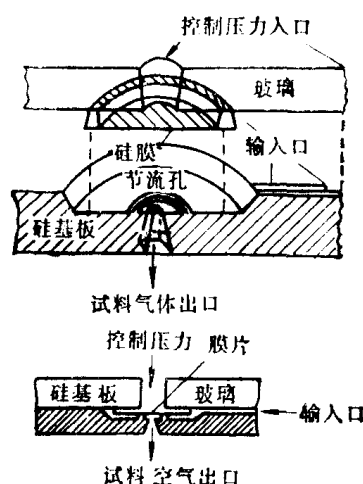


图1.5 采样开关阀的结构

微细加工技术, 除可在硅片上制作超小型传感器外, 还可在同一硅片上将放大电路、滤波器等信号处理电路和稳压电源等辅助电路跟敏感元件加工在一起。用微细加工技术亦可在硅片上制作微处理器, 故在一块芯片上能制作集成度很高的传感器。

1.4.4 仿生传感器

传感器相当于人的五官, 但至今真正能代替人的感觉功能的传感器极少。虽然有的传感器某些性能超过人, 但在检测多维复合量方面, 传感器的水平则不如人, 尤其是相当于人体酶传感器的嗅觉、味觉等化学传感器, 还远未达到人体感觉器那样高的选择性。实际上, 传感器由一些非常简单的元件组成, 而人体感觉器官则由非常复杂的细胞组成, 形成细胞的蛋白质又十分复杂。这样, 构成人体的细胞就像一台超级电子计算机那样复杂, 每个人约有50万亿台这样的超级电子计算机。因此, 要用工程传感器完全代替人的五官, 似乎是不可能的事。今后的科学技术, 就是尽量向人自身的功能逼近。研究人的感觉器官的功能, 开发仿生传感器已受到各国学者的高度重视。

一、生物膜与生物的感觉功能

生物体的生物膜能对外界刺激作出反应, 厚约 $6 \sim 10\text{nm}$, 它含有许多受容细胞。生物膜是一种磷脂质双层膜, 蛋白质像瓷砖一样镶在上面。生物体细胞的内侧对外有 $-50 \sim -100\text{mV}$ 的负电位, 该电位差即是膜电位。当生物膜受外界刺激作用时, 膜电位发生变化, 跟受容细胞相连的神经发出脉冲, 并传递到神经中枢。

如果外来刺激是光, 则由于蛋白质敏感光, 膜电位发生变化; 如果外来刺激是化学物质, 则由于膜附着化学物质, 从而引起膜电位变化。已研究发现, 植物的叶绿体膜有光电动势效应。

二、嗅觉器官与气敏传感器

生物体的嗅觉细胞能检测维生素 A 和类胡萝卜素的气味。β 胡萝卜素是类胡萝卜素的一种, 将其粉末用溶剂溶解后, 涂在玻璃板上制成薄膜。薄膜吸收酒精或丙酮的蒸气后, 其导电率明显增加。对人没有感觉的氮、氢、氦等气体, 对人体也不会引起导电率变化, 而人能强烈感觉的气体, 则会引起导电率明显增加。

类胡萝卜素的分子结构与导电率的关系如图 1.6 所示。图 1.6(b) 示出将有臭味的气体物质注入 β 胡萝卜素粉末中后, 暗电流随时间的变化, 其中箭头表示气体换成氮气时的特性。这里用人造生物膜揭示的生物嗅觉的机理可用于气敏传感器。

三、仿生化学传感器

在人造膜上植入具有某种功能的生物组织, 利用这种组织的选择作用和化学放大功能, 研制了酶传感器和免疫传感器等仿生化学传感器。固定在人工膜上的生物受容物质有选择地吸收被检测物质后, 生成一种复合体, 利用这种复合体的性质即可构成仿生化学传感器。

1. 免疫传感器

免疫传感器是一张人造膜, 抗体固定在膜上, 膜对抗原有选择地进行结合, 使膜电位发生变化。若将抗原固定在膜上, 其作用和固定抗体相同。例如, 将梅毒的抗原固定在人工膜上, 膜跟梅毒患者血清中的梅毒抗体相结合, 使膜电位发生变化。检测膜电位可用检测 pH 时用的离子电极。

2. 酶传感器

这种传感器是将生物酶固定在膜上, 由于酶的催化作用, 有选择地使被检测的对象物质变换成反应生成物, 再通过电化学方法把反应生成物(或消耗掉的物质)转换为电信号。所谓电化学方法即是将化学反应产生的电动势变换为传感器的电位差, 或将化学反应产生的电流变换为流过传感器的电流。若反应生成物是 H_2O_2 或 O_2 , 则采用电流变换方式, 用氧电极。若生成物使膜电位发生变化, 则采用电位变换方式, 用铵离子电极和氢离子电极等。表 1.4 列出各种酶传感器的特性, 其中许多传感器的性能还不稳定。

3. 微生物传感器

用微生物取代固定在膜上的酶, 利用微生物有选择的反应特性即可构成微生物传感器。使用的膜一般用骨胶原或多孔醋酸纤维素制成。表 1.5 列出微生物传感器的特性, 其中酒精、醋酸、谷胱氨酸等传感器可用于发酵过程在线实时检测。正在开发的微生物与

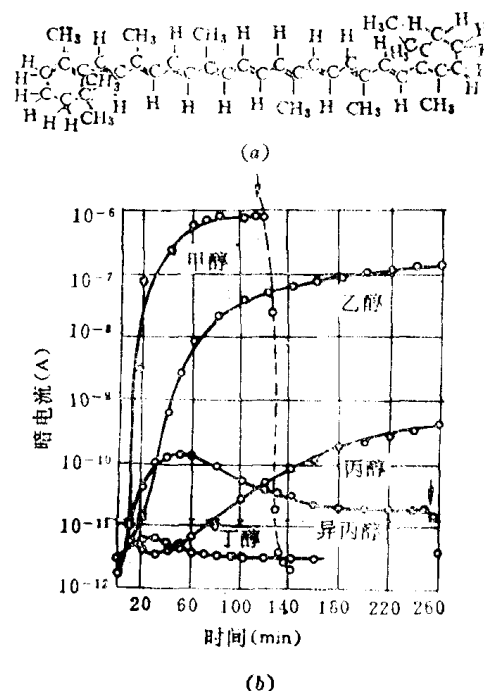


图 1.6 不同气体 β 胡萝卜素的电导率随时间的变化

(a) β 胡萝卜素的分子结构;

(b) 暗电流与时间的关系。

表1.4 酶传感器的特性

传感器	酶	固定法	电化学装置	稳定性 (d)	响应时间 (min)	测定范围 (mg/l)
葡萄糖	葡萄糖氧化酶	共价结合法	氧电极	100	1/6	$1 \sim 5 \times 10^2$
乙醇	葡萄糖氧化酶	交联法	氧电极	120	1/2	$5 \sim 10^4$
丙酮酸	丙酮酸氧化酶	吸附法	氧电极	10	2	$10 \sim 10^3$
尿酸	尿酸酶	交联法	氧电极	120	1/2	10×10^3
L-氨基酸	L-氨基酸氧化酶	共价结合法	氨气电极	70	—	$5 \sim 10^2$
L-谷氨酸	谷酰胺酶	吸附法	氨离子电极	2	1	$10 \sim 10^4$
L-谷氨酸	谷氨酸脱氢酶	吸附法	氨离子电极	2	1	$10 \sim 10^4$
天门冬氨酸	天门冬酰胺酶	包括法	氨离子电极	30	1	$5 \sim 10^3$
L-酪氨酸	L-酪氨酸脱羧酶	吸附法	二氧化碳电极	20	1 ~ 2	$10 \sim 10^4$
L-赖氨酸	L-赖氨酸脱羧酶 胺氧化酶	交联法	氧电极	—	1 ~ 2	$10^3 \sim 10^4$
L-藻氨酸	L-藻氨酸脱羧酶 胺氧化酶	交联法	氧电极	—	1 ~ 2	$10^3 \sim 10^4$
L-苯丙氨酸	L-苯丙氨酸 氨解酶	—	氨气电极	—	10	$5 \sim 10^2$
L-蛋氨酸	L-蛋氨酸氨解酶	交联法	氨气电极	90	1 ~ 2	$1 \sim 10^3$
尿素	尿酸酶	交联法	氨气电极	60	1 ~ 2	$10 \sim 10^3$
胆固醇	胆固醇酯酶	共价结合法	铂电极	30	3	$10 \sim 5 \times 10^3$
中性脂肪	脂肪酶	共价结合法	pH电极	14	4	$5 \sim 5 \times 10$
磷脂	磷脂酶	共价结合法	铂电极	30	2	$10^4 \sim 5 \times 10^3$
一元胺	一元胺氧化酶	包括法	氧电极	7 以上	4	$10 \sim 10^2$
青霉素	青霉素酶	包括法	pH电极	7 ~ 14	0.5 ~ 2	$10 \sim 10^3$

表1.5 微生物传感器的特性

传感器	微生物	固定法	电化学装置	稳定性 (d)	响应时间 (min)	测定范围 (mg/l)
葡萄糖	<i>P. fluorescens</i>	包括法	氧电极	14 以上	10	$5 \sim 2 \times 10$
蜜化糖	<i>B. lactofermentum</i>	吸附法	氧电极	20	10	$20 \sim 2 \times 10^2$
甲醇	未固定菌	吸附法	氧电极	30	10	$5 \sim 2 \times 10$
乙醇	<i>T. brassicac</i>	吸附法	氧电极	30	10	$5 \sim 3 \times 10$
醋酸	<i>T. brassicae</i>	吸附法	氧电极	20	10	$10 \sim 10^2$
甲酸	<i>C. butyricum</i>	包括法	燃料电池	30	30	$1 \sim 3 \times 10^2$
谷氨酸	<i>E. coli</i>	吸附法	二氧化碳电极	20	5	$10 \sim 8 \times 10^2$
赖氨酸	<i>E. coli</i>	吸附法	二氧化碳电极	14 以上	5	$10 \sim 10^2$
谷氨酸	<i>S. fiava</i>	吸附法	氨气电极	14 以上	5	$20 \sim 10^3$

(续)

传感器	微生物	固定法	电化学装置	稳定性(d)	响应时间(min)	测定范围(mg/l)
藻氨酸	<i>C. faecium</i>	吸附法	氨气电极	20	10	10~170
天冬氨酸	<i>B. cacaveris</i>	吸附法	氨气电极	10	5	$5 \times 10^{-1} \sim 90$
氨	硝化菌	吸附法	氧电极	20	5	5~45
制真菌素	<i>S. cerevisiae</i>	吸附法	氧电极	—	60	$1 \sim 8 \times 10^2$
烟酸	<i>L. arabinosus</i>	包括法	pH电极	30	60	$10^{-2} \sim 5$
维生素B	(<i>L. fermenti</i>)	—	燃料电池	60	360	$10^{-8} \sim 10^{-2}$
头孢菌素	<i>C. freundt</i>	包括法	pH电极	7以上	10	$10^2 \sim 5 \times 10^2$
BOD	<i>T. cutaneum</i>	包括法	氧电极	30	10	$5 \sim 3 \times 10$
菌数	—	—	燃料电池	60	15	$10^6 \sim 10^7$ (个/ml)

酶组合在一起的仿生传感器,可用于检测肌肉素、尿素、血液中的氨基酸等。

酶和微生物的功能十分复杂,其中大部分还未弄清楚,而开发这方面的新型传感器,有助于该领域的理论和技术的发展,应引起传感器工作者的足够重视。

§ 1.5 传感器的需求动向

近年来,国内外都出现了传感器热,企事业单位和各级主管部门越来越关心传感器。原因是,由于微型计算机的普及,传感器与微型计算机结合能增加检测装置的功能,利用微型计算机存储数据的能力,可进行过去不能完成的计算与分析,还能利用这些计算与分析结果控制设备仪器。显然,如果没有传感器提供信息给计算机,计算机就不可能完成上述功能。这大概就是人们对传感器寄予极大关心与期待的原因。

由于传感器与微型计算机结合能使装置的功能增加和性能提高,故许多过去不用传感器的领域开始大量使用传感器。因此,传感器的市场十分庞大,当今令人瞩目的市场是家用电器和汽车制造业。传感器在家用电器中的应用在作者新近著作《传感器电子学及其应用》一书中有详细介绍,传感器在汽车电子学中的应用将在第二十三章中介绍。这里仅介绍几个部门对传感器提出的需求动向。

1.5.1 家用电器与传感器

家用电器安装传感器的主要目的是节能。表 1.6 列出日本普通家庭一年内消耗电力

表1.6 日本普通家庭平均年电力消费的百分比

类 别	电力消耗率 (%)	类 别	电力消耗率 (%)
冰箱	28.2	吸尘器	4.6
照明电器	21.8	高频电子食品加热器	3.6
电视	12.5	电褥子	1.7
空调	12.0	洗衣机	1.6
电器炊具	7.0	电风扇	0.4
取暖电桌	6.6	合计	100.0

的百分比,其中冰箱耗电最多,约占 $1/3 \sim 1/4$,其次是照明电器、彩色电视机和空调机等,约占 $3/4$ 。为了节能,日本掀起了家用电器节能运动,空调机和冰箱等采用传感器后,不仅提高了工作效率,还大大降低了电能消耗。图1.7示出有效体积为 230dm^3 的双开门电冰箱,其耗电量逐年变化情况。图1.8示出空调机耗电能量的逐年下降情况〔专用冷房 $560\text{W}1800\text{kcal}(7.5348\text{MJ})/\text{h}$ 间隙工作〕,图中COP是冷冻能力/耗电功率的比率。下面简述冰箱和空调机今后对传感器提出的要求。

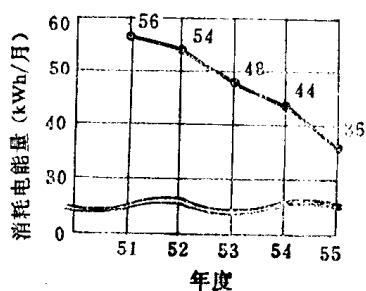


图1.7 冰箱耗电能量的逐年变化

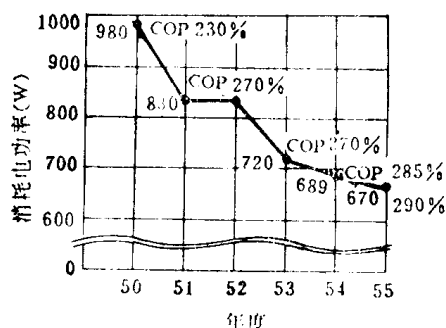


图1.8 空调机耗电能量的逐年变化

一、冰箱与传感器

冰箱要解决的最大问题是节能。减少能量消耗的措施,一是改进冰箱压缩机和隔热材料,二是使整个控制系统向电子化方向发展。冰箱需要的传感器有五种:(1)代替过去压力式热电开关的热敏电阻或热敏舌簧继电器;(2)显示冰箱开关的报警器;(3)除霜传感器;(4)结霜传感器;(5)保持蔬菜新鲜度的湿度传感器。

二、室内空调与传感器

室内空调,既要考虑节能,又要考虑消除过冷或温度转换时给人的不舒适感觉,解决的办法是通过微型计算机和传感器组成的电控系统进行控制。空调机的压力式热电开关已改为热敏电阻。今后需要的主要传感器:稳定性好的长寿命温度传感器,以及结霜传感器、冷煤气压力传感器和空气流量传感器等。利用这些传感器能实现:防止就寝时过冷;控制室外气温给定温度的变速器;控制室内负荷压缩机能力的切换;湿度控制;冬天启动热泵时除霜。

三、家用传感器展望

家用传感器今后希望发展家庭防灾用传感器和类似于机器人感觉的传感器。前者分两类,一是检测煤气泄漏和火灾前征兆的煤气、温度、烟雾等传感器,二是防止强盗入侵的传感器。后者是实现家务劳动自动化和省力化的各种家用电器用传感器,如全自动洗衣机用传感器。若将清扫机、洗碗机等跟视觉、触觉传感器组合在一起,则可完成家庭主妇不愿干的家务事。随着家用电器智能化,家庭生活将会变得更舒适愉快。

1.5.2 汽车电子控制与传感器

汽车传感器在二十三章中将作较详细的介绍,这里仅简述需求动向。

一、空气流量传感器

为了净化排气和降低燃料消耗,需要精确地控制空气-燃料比。这种控制要求空气