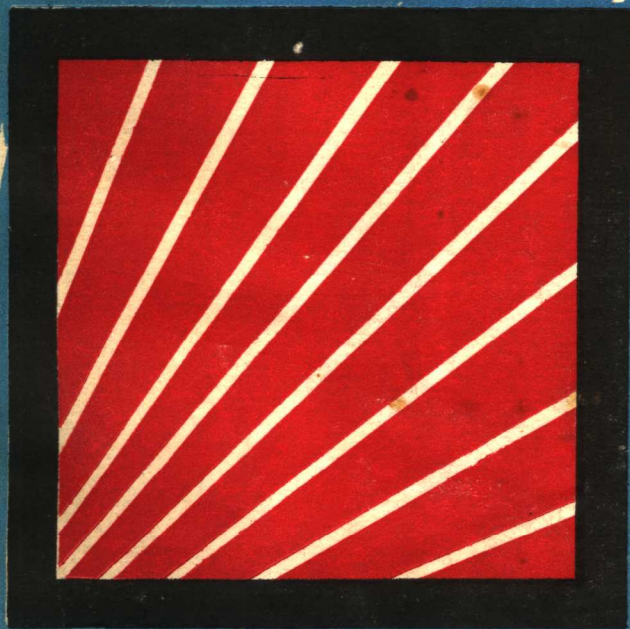


新型传感器原理

黄俊钦 等著



航空工业出版社

新型传感器原理

黄俊钦 等著

航空工业出版社

1991

内 容 简 介

本书由多年从事传感器技术与教学工作的专家与教授编著而成。书中搜集、整理和总结了近代国内外各种新型传感器的技术资料、研究成果和实践经验。

全书共分七章，内容包括磁敏传感器、铁电聚合物传感器、非晶态固体传感器、半导体气体传感器、固体电解质气体传感器以及生物传感器等，详细介绍了它们的基本概念、结构原理、实验结果，并作了数据分析和研究。

本书可作为高等院校仪表与测试专业学生的教科书，也可供测试技术、自动控制、精密仪器、医学卫生等专业的学生和有关工程技术人员参考。

新型传感器原理

黄俊钦 等著

航空工业出版社出版发行

(北京市和平里小关东里14号)

—邮政编码:100029—

全国各地新华书店经售

北京通县向阳印刷厂印刷

1991年5月第1版

1991年5月第1次印刷

开本: 787×1092毫米 1/16 印张: 16

印数: 1—1 800

字数: 400千字

ISBN 7-80046-319-2/G·037

定价: 3.90元

序 言

当今，世界已进入信息技术时代，作为获取信息主要工具的传感器，在工业发达国家受到高度重视，并被列为优先发展的高技术之一。传感器技术、通信技术和计算机技术统称为现代信息技术的三大主要支柱。传感器是感受和转换各种信息的敏感元器件，能把非电量如温度、湿度、压力、声、光、磁等定量地转换成电信号。它在工业自动化、农业自然灾害预防，交通运输、安全生产、医疗诊断、环境监测、家用电器等各个方面都得到广泛地应用，在国防、科学试验及高科技领域更占有重要地位。美国人把航天飞行器看成是高性能传感器的集合体。人造卫星依靠各种各样的传感器，保证它在正确轨道上运行，并接收空间中的大量信息传送到地球上。在科学试验中，其测试数据的精确度与可靠性在很大程度上取决于传感器的性能。所以，世界上一些发达国家的科技界普遍认为，80年代是传感器元器件技术时代，传感器技术是与科学进步关系最为密切的技术。

近十余年来，传感器被许多国家列为重点技术发展项目，取得了引人注目的迅速发展，出现了许多新型传感器。例如日本，1964年有关传感器技术的专利为300项，而到1984年增为3000余项。随着国民经济的发展，我国对传感器的研究和应用日益广泛，并取得了不少成果。

本书是由多年从事传感器技术研究的知名专家、教授编著的。他们搜集、整理了近年来国内外最新研究成果和技术资料，加上自己多年来的科研成果和实践经验，编著成这本书。

我们将这本书介绍给读者，希望对从事测试工作的科技人员，对从事传感器研究、应用和教学的人员有所帮助。

本书只讨论几种有发展前途的传感器，一般参考书中介绍过的这里不再讨论。全书共分七章，各章作者依次为谭祖根、黄俊钦、王立人、王绪威、**王中纪**、王宝忱、李培德。黄俊钦为主编，谭祖根和王绪威为副主编。审稿人，第一、二章为师克宽，第三章为刘广玉，第四章为程先安，第五、六章为宋心琦，第七章为罗忠诚。他们还对各章提出许多宝贵意见，特此致谢。王绪威对第五、六、七章的图和文稿进行了整理。

本书收集的资料截止到1986年。书中不妥和错误之处，敬请读者指正。

孙世贵*

1989年12月于北京

* 孙世贵同志系航空航天工业部科学技术研究院测控处处长

目 录

第一章 概 论

§ 1-1 传感器	(1)
§ 1-2 开发新型传感器的意义	(2)
§ 1-3 光导纤维传感器	(3)
一、光导纤维及光的传输	(3)
二、光纤传感器原理	(4)
三、光纤传感器实例	(5)
§ 1-4 CCD 光电传感器	(7)
一、电荷耦合器件	(7)
二、CCD 传感器在检测中的应用	(9)
§ 1-5 液晶传感器	(11)
§ 1-6 陶瓷传感器	(12)
一、概述	(12)
二、湿度—气体陶瓷传感器	(12)
三、温度—湿度陶瓷传感器	(15)

第二章 磁敏传感器

§ 2-1 概述	(17)
§ 2-2 霍尔效应和霍尔元件	(18)
一、霍尔效应	(18)
二、霍尔元件	(19)
三、霍尔探头	(24)
四、霍尔集成电路	(24)
§ 2-3 霍尔传感器	(26)
一、霍尔高斯计	(27)
二、霍尔角位移传感器	(27)
三、霍尔直流—交流变换器	(27)
四、霍尔乘法器和功率传感器	(28)
五、霍尔线位移传感器	(29)
六、霍尔压力传感器	(29)
七、霍尔转速传感器	(29)
八、多用途霍尔固态传感器	(30)
九、弱磁场传感器与霍尔磁罗盘	(32)

§ 2-4 磁敏电阻效应与传感器	(32)
一、磁敏电阻效应	(32)
二、磁敏电阻元件	(33)
三、磁敏电阻传感器	(37)
§ 2-5 结型磁敏元件	(39)
一、磁敏二极管	(39)
二、磁敏三极管(晶体管)	(40)
三、4CCM型硅磁敏晶体管差分电路	(42)
§ 2-6 利用磁敏二极管和三极管的传感器	(43)
一、用来做输出连续信号的传感器原理与特性	(43)
二、将该传感器做接近开关时的特性	(47)
三、用来做输出频率信号传感器的原理与特性	(47)
§ 2-7 韦甘德(<i>Wiegand</i>)磁敏器件与传感器	(49)
§ 2-8 磁场向量硅集成传感器	(50)
一、构造	(50)
二、作用原理与特性	(50)
三、磁场向量硅集成传感器	(51)

第三章 铁电聚合物传感器

§ 3-1 概述	(53)
一、铁电体	(53)
二、一类新的铁电材料——铁电聚合物	(54)
§ 3-2 聚偏二氟乙烯的分子结构与晶体形态	(56)
§ 3-3 聚偏二氟乙烯的铁电性	(57)
§ 3-4 聚偏二氟乙烯材料处理与元件制作技术	(60)
一、拉伸	(60)
二、极化	(61)
三、电极	(65)
四、信号引线与连接技术	(65)
§ 3-5 聚偏二氟乙烯及其它铁电聚合物在传感器技术上的应用	(67)
一、电声传感器	(69)
二、机械振动测量	(71)
三、心音、血压等生理参数的测量	(73)
四、医用超声换能器	(76)
五、水听器与超声水听器探头	(81)
六、投币传感器	(85)
七、软接触式物体感知器件	(86)
八、电校准式热释电辐射计	(88)
九、红外成象器件——红外摄影视象管	(90)

十、红外报警装置	(90)
十一、机器人触觉传感器	(91)

第四章 非晶态固体传感器

§ 4-1 概述	(96)
§ 4-2 用于传感器的非晶态合金材料及其性能	(98)
一、非晶态合金材料的磁特性	(98)
二、非晶态合金材料的非磁特性	(103)
三、用于传感器的非晶态合金材料的主要性能	(104)
四、非晶态合金敏感元件和传感器的分类	(104)
§ 4-3 利用 $\lambda_s=0$ 的非晶态合金带或丝的传感器	(104)
一、传感器的组成和特点	(104)
二、双磁芯多谐振荡器桥路	(106)
三、位移传感器和电流传感器	(108)
§ 4-4 利用高 λ_s 非晶态合金带或丝的超声传播效应的传感器	(110)
一、超声传播效应	(110)
二、平均温度传感器	(110)
三、脉冲序列振荡型距离传感器	(113)
四、压力传感器	(114)
§ 4-5 利用高 λ_s 非晶态合金带应力—磁效应的传感器	(116)
一、力传感器	(116)
二、应变传感器	(119)
三、扭矩传感器	(121)
四、冲击应力传感器	(124)
§ 4-6 利用高 λ_s 非晶态合金带的大巴克好森效应和迈梯欧锡斯效应的传感器	(128)
一、大巴克好森效应和迈梯欧锡斯效应	(128)
二、利用卷状退火的富铁非晶态合金带的双稳态磁传感器	(130)
三、利用扭卷富铁非晶态合金带的双稳态磁传感器	(133)
四、利用塑性螺旋状富铁非晶态合金带的双稳态磁传感器	(136)
§ 4-7 非晶硅传感器	(139)
一、非晶硅基本敏感特性简介	(139)
二、非晶硅光传感器	(141)
三、非晶硅热电传感器	(145)
四、非晶硅应变传感器	(147)

第五章 半导体气体传感器

§ 5-1 概述	(151)
§ 5-2 气敏半导体材料	(153)
一、典型气敏氧化物的晶体结构	(153)

二、氧化物半导体中的结构缺陷	(154)
三、氧化物半导体表面	(157)
§ 5-3 利用表面电导变化的气敏元件	(158)
一、表面电导控制型气敏元件的检测机理	(158)
二、气敏半导体元件的选择性	(160)
三、 SnO_2 系气敏半导体元件	(161)
四、 ZnO 系气敏半导体元件	(163)
五、其它表面电导控制型元件	(165)
§ 5-4 利用材料体电导的气敏元件	(166)
一、原理	(166)
二、 $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 和 $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 气敏元件	(166)
三、 ABO_3 型材料气敏元件	(168)
四、半导体型氧传感器	(168)
§ 5-5 结型半导体气敏元件	(171)
一、二极管型气敏元件	(171)
二、MOS电容结构气敏元件	(172)
三、MOS场效应气敏管(MOSFET)	(174)
§ 5-6 气敏半导体的应用	(175)
一、气敏半导体元件的特点	(175)
二、气敏半导体的应用领域	(176)
三、应用气敏半导体元件的检测回路	(176)
四、使用气敏半导体元件应注意的问题	(177)

第六章 固体电解质气体传感器

§ 6-1 无机固体电解质气体传感器	(181)
一、氧化物固体电解质的构造和导电特性	(181)
二、氧浓差电池与氧传感器	(186)
三、氧传感器的构造和分类	(195)
四、氧固体电解质气体传感器的应用	(197)
五、固体电解质 SO_x 传感器	(202)
§ 6-2 高聚物固体电解质气体传感器	(207)
一、高聚物固体电解质膜的结构和类型	(207)
二、恒电位电解电化学气体传感器的工作原理	(210)
三、高聚物固体电解质气体传感器的构造和应用	(213)

第七章 生物传感器

§ 7-1 概述	(219)
§ 7-2 功能膜的制备与传感器测量装置	(220)
一、生物识别功能物质与固定化技术	(220)

二、基本电极和测量方式	(222)
§ 7-3 酶传感器	(224)
一、酶的催化和分子识别功能	(224)
二、酶传感器的原理、结构和特性	(225)
三、酶传感器的应用	(227)
§ 7-4 微生物传感器	(230)
一、微生物传感器的分类	(230)
二、微生物传感器的原理和特性	(230)
三、微生物传感器的应用	(232)
§ 7-5 免疫传感器	(236)
一、非标记免疫传感器	(236)
二、标记免疫传感器	(237)
三、免疫传感器的应用	(238)
§ 7-6 其它生物传感器	(239)
一、细胞器传感器和组织传感器	(239)
二、半导体生物传感器	(240)
三、酶热敏电阻传感器	(241)
四、光电生物传感器	(242)
五、生物传感器的未来	(243)

第一章 概 论

§1-1 传感器

科学技术发展的目的是什么？可以说是用机械代替人的劳动，甚至做人的劳动所力不能及的工作。人类的劳动可分为体力劳动和脑力劳动。用机械化代替体力劳动是第一次产业革命。在这次革命中，火车、汽车取代了人力车，各种动力机械取代了繁重的劳动。用机械和电子装置来代替部分脑力劳动，可以说是第二次或第三次产业革命，这也是当前科学技术发展的主要课题。

一个人接受外界信息，并用大脑思维的过程(如图 1-1 所示)，亦即用人的五官接收外界信号，并将其送入大脑，进行信息处理。从现有的相应的机械电子装置来说，电子计算机相当于人的大脑，所以常把电子计算机称为“电脑”，而相应于人的五官部分的装置就是传感器。

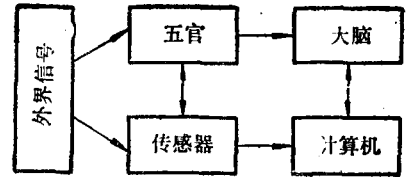


图1-1 生物功能与传感器

传感器是一种获得信息的装置。它的定义是：借助于检测元件接收一种形式的信息，并按一定规律将它转换成另一种信息的装置。它获取的信息，可以为各种物理量、化学量和生物量，而转换后的信息也可以有各种形式。目前的传感器大多为电信号，因而从狭义上讲，传感器也可定义为，把外界的输入信号转换成电信号的装置。

在一个自动化系统中，首先要能检测到信息，才能去进行自动控制，因此传感器是首当其冲。如果传感器不能获得信息，或者获得的信息不确切，或者不能把信息精确地转换成电信号，那么要把这些信息显示、处理就困难了，甚至没有意义了，为此传感器关系着一个测量系统或自动化系统的成败。目前，传感器的应用领域已十分宽广，在国防、航空、航天、交通运输、能源、电力、机械、石油化工、轻工、纺织……等工业部门和环境保护、生物医学工程方面都已采用了大量的传感器，而且也已逐渐把传感器应用到办公用和家庭用的电器设备上，如电饭锅、洗衣机、吸尘器、现金出纳机、自动门……等，这些都是借助传感器而实现自动化的。所以有人把传感器比作为“支撑现代文明的科学技术”，这就可以看出研究传感器的意义。

由于应用的对象、测量的范围、周围的环境等不同，需要用的传感器也不一样，因此传感器的种类是很多的。对于传感器的分类方法，目前常用的有两种：一种是以被测的参量来分，另一种是以传感器的工作原理来分。

以被测量来分，可以分为以下几类：

1. 热工量：温度、热量、比热、热流、热分布；压力、压差、真空度；流量、流速、风速。
2. 机械量：位移、尺寸(长度、厚度、宽度、角度)、形状；力、力矩、应力；重量、

质量；转速、线速度；振动、加速度、噪声。

3. 物性和成份量：气体化学成份、液体化学成份；酸碱度、盐度、浓度、粘度；密度、比重。

4. 状态量：颜色、透明度、磨损量、裂纹、缺陷、泄漏、表面质量。

以传感器的工作原理来分，可以分为以下几类：

1. 电阻式(包括应变式、电位计式、压阻式、热电阻式)；
2. 电感式(包括自感式、差动变压器式)；
3. 电容式；
4. 阻抗式(也称电涡流式)；
5. 磁电式；
6. 热电式；
7. 压电式；
8. 光电式(包括光电式、激光式、红外式、光栅式、光导纤维式)；
9. 振频式(包括振弦式、振片式、振筒式)；
10. 霍尔式。

此外，尚有超声式，同位素式，微波式，电化式，同步感应器式，磁栅式等。

在这两种分类方法中，以被测量分时，对使用的对象比较明确，而以工作原理分时，则对传感器所采用的原理比较清楚。现在习惯上常把两者结合起来称呼，如光电式转速传感器，电容式压力传感器等。

§1-2 开发新型传感器的意义

现代科学技术促进了电子计算机的发展。目前的计算机，除大脑的思维以外，有很多功能远远超过大脑。与此相比，传感器就显得非常落后。也就是说，现代科学技术因电子计算机与传感器未能取得协调发展而面临着许多问题。正因如此，世界上许多发达国家都在努力研究各种新型传感器，改进传统的传感器，从而出现一股国际性的“传感器热”。在日本，把传感器技术列入六大核心技术之一（六大核心技术为计算机、半导体、通信、激光、超导和传感器技术）。在美国的“空军2000年”报告中列举了15项有助于提高21世纪空军能力的关键技术项目，其中列为第2项重点项目的就是传感器，因此开发各种新型传感器已成为当前发展科学技术的主要课题之一。

传感器虽然是一个小小的装置，但是它的涉及面却非常广。传感器利用的原理包括了各种物理效应、化学反应、生物功能等。一般来说，传感器体积小，重量轻，材料用得不多，但是它们采用的材料却包括了黑色金属、有色金属、稀土金属、工程塑料、半导体材料、陶瓷材料、高分子材料以及各种特殊材料（如压电材料、热电材料、恒弹性材料、高磁导率材料等）。从传感器的工艺来看，也包括了机械加工、电加工、化学化工、光学加工以及各种特殊工艺（如电子束焊、离子注入等）。目前国际上，如果出现一种新材料、新元件或新工艺，就会很快地应用于传感器，并研制出一种新的传感器。例如：半导体材料与工艺的发展，就出现了一批能测很多参数的半导体传感器；大规模集成电路的成功，发展了有测量、运算、补偿等功能的智能传感器；生物技术的发展，出现了利用生物功能的生物传感器。因

此，各个学科的技术发展，促进了传感器技术的不断发展，而各种新型传感器的问世，又不断为各部门的科学技术服务，促使现代科学技术进步。它们是相互依存、相互促进，这也说明了目前要开发新型传感器不但重要，而且也是可能的。

在我国，近20年来，传感器虽然有了较快的发展，已有不少传感器在市场上供应，但大多数是测量常用的参数、常用的量程、中等的精确度，从我国四个现代化建设的要求来看，还远远不能满足需要。与国际水平相比，我国的传感器不论在品种、数量、质量方面，都有很大的差距。为此，我们必须努力开发各种新型传感器，以满足我国四化建设的需要。

为了加快我国传感器的发展，国家科委组织有关部门和各方面专家制订了传感器技术政策，把半导体、陶瓷、光纤等新型传感器列入信息技术的优先发展领域，并鼓励发展结构型与固定型相结合的复合型传感器、智能传感器和生物传感器等。此外，也把传感器列入了“七五”科技攻关项目，这也是对我们从事传感器工作的科技人员所提出的任务。

为了在我国开发新型传感器，本书的编著者们根据自己工作实践的体会和收集的资料，编写了这本书，希望能为传感器的发展作一点微薄的贡献。对于某些新型传感器，如光纤传感器，陶瓷传感器等，因发表的文章较多，或已有专门的书籍介绍，在此就不专门列章编写，仅仅为了本书的完整起见，只在“概论”一章中作一简单的介绍。

§1-3 光导纤维传感器

光导纤维是传输光的导线，简称光纤。

自1970年美国康宁公司研制成功传输损耗为 20dB/km 的光纤后，就开始应用于工程技术。同年，美国贝尔实验室和日本电报电话公司研制成功镓铝砷半导体激光器，更为光导纤维开创了高速发展的局面。十多年来，已研制出塑料、多组份玻璃、液芯等光纤。由于光纤具有信息传输量大、抗干扰能力强、保密性好、重量轻、尺寸小、柔软等优点，因此光纤通信已被国际上认为是一种很有发展前途的通信手段。近几年来，也逐步应用于检测技术方面，研制出了各种光纤传感器，用来测量位移、温度、压力、流量、液位、电场、磁场等参数。据国际上预测，光纤传感器在90年代将会迅速发展。

一、光导纤维及光的传输

光在介质中传播时，如果经过两个不同的介质面，就会发生折射和反射，如图 1-2 所示。一束光从折射率为 n_1 的介质中以入射角 α_1 射向界面，一部份光透射过界面进入折射率为 n_2 的介质中，出射角为 α_2 ；另一部份在界面上反射回来，反射角为 α'_1 。它们之间的关系式为：

$$n_1 \sin \alpha_1 = n_2 \sin \alpha_2 \quad (1-1)$$

$$\alpha_1 = \alpha'_1 \quad (1-2)$$

当 $n_1 > n_2$ 时， $\alpha_1 < \alpha_2$ 。如果光由折射率大的介质 (n_1) 射向折射率小的介质 (n_2)，当入射角 α_1 增大到某一个值 α_c 时，有可能使出射角 $\alpha_2 = 90^\circ$ ，这就是说，光不能穿出两个介质的界面而完全反射了回来，这就是“全反射”原理。

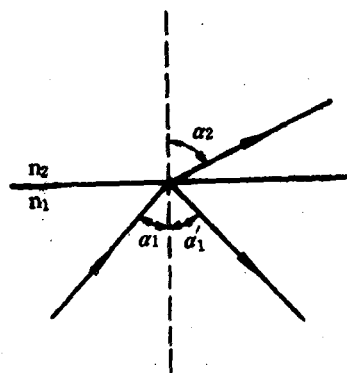


图1-2 光在介质界面上的反射与折射

α_c 称为全反射的临界角，它由两个介质的折射率决定，即

$$\alpha_c = \sin^{-1} \frac{n_2}{n_1} \quad (n_1 > n_2) \quad (1-3)$$

光在光纤中的传输就是利用了全反射原理。一般光纤的结构如图 1-3 所示，它由导光的芯体玻璃(称为纤芯，如 $P_2O_5 \cdot SiO_2$)和周围包皮玻璃(称为涂层，如 $B_2O_3 \cdot SiO_2$)所组成，它们的折射率分别为 n_1 和 n_2 ，并且 $n_1 > n_2$ 。当光线从折射率大的介质射向折射率小的介质，

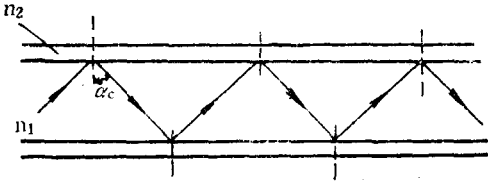


图1-3 光在光纤中的传输

并且入射角大于临界角时，则在两介质的分界面上发生全反射。这样，光将在光纤的界面上反复发生全反射，成“之”字形前进而达到传输的目的。发生全反射时，界面的损耗是很小的，其反射率一般可达0.9955，比反射性最好的金属——铝还高。所以光在光纤中的传输损耗主要不是由反射损失造成的，

而是由散射和光纤的吸收引起的。光纤在工作时需要弯曲，但只要满足全反射定律，光线仍能继续前进。

光纤分单模和多模两种。单模光纤的芯很细，一般直径在 $5\mu m$ 以下。光在单模光纤中的传输问题，需用电磁波理论来分析。多模光纤的芯径比较大，约为 $80\mu m$ 左右。

二、光纤传感器原理

根据光纤在传感器中的作用，光纤传感器的原理一般可以分为两大类。

(一) 利用光纤本身的特性变化

这类光纤传感器以激光器或发光二极管为光源，用光导纤维作为光的通道，将光束传输到光电元件和检测电路。当外界的被测参数(如压力)作用于光纤上，使光纤中传播的光的强度和相位发生变化，通过测量光强和相位变化，就可知道被测参数的变化。其原理简图如图 1-4 所示。从上述原理可见，这类传感器中光纤不仅作为光传播的导体，而本身就具有测量的功能，可直接用光导纤维作为敏感元件，所以称为物性型光纤传感器或功能型光纤传感器。它们可用来测量应变、温度、压力、电压、电流、磁场等参数。

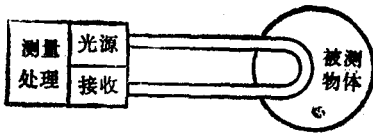


图1-4 物性型光纤传感器原理的简图

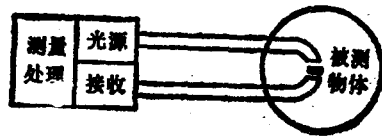


图1-5 结构型光纤传感器原理的简图

(二) 利用光纤传输光的特性

这类光纤传感器在光纤传输光的过程中，被测物本身或采取特殊元件，使在光纤中光的通过情况或传输特性变化，然后用光电元件转换成电信号，其原理简图如图 1-5 所示。在这类传感器中，光纤的主要作用是传输光，因此称为结构型光纤传感器。它们可用来测量位移、压力、转速等参数。

三、光纤传感器的实例

(一) 位移传感器

用光纤传感器测量位移时，传感器一般由一束叠放成双“D”形的光导纤维组成，其示意图如图 1-6 所示，光纤分成两股，一股作为传输光纤，一股作为接收光纤。当光源发出的光束入射至传输光纤，在其 D 形端部处射至被测体。如果被测体能反射的话，则反射至接收光纤，由接收光纤传输至另一端，用光电元件转换成电量。从图 1-7 可以看出，传感器的端部与被测体的距离不同，反射至接收光纤的光通量亦不同，亦即入射到光电元件的光强将随距离而变，因此光电元件输出的电量大小与传感器端部至被测体间的距离有关，故可用它来测量位移值。这种光纤式位移传感器，它的端部与被测体间的

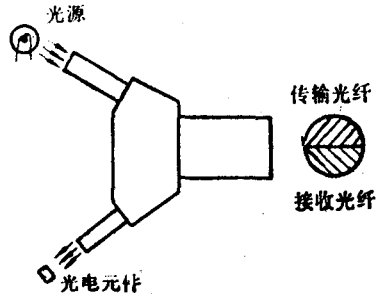


图 1-6 光纤式位移传感器

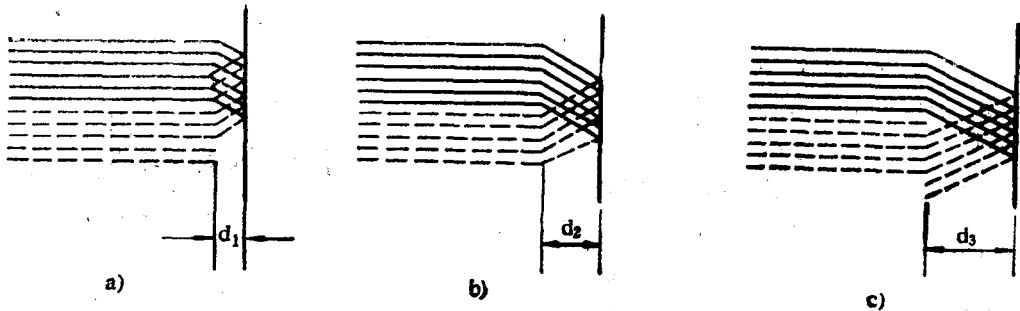


图 1-7 投射距离对光强的作用

距离 d 和光强间的关系曲线如图 1-8 所示。从曲线可见，在距离小于 b 时，利用 ab 段；在距离大时，应利用 bc 段。

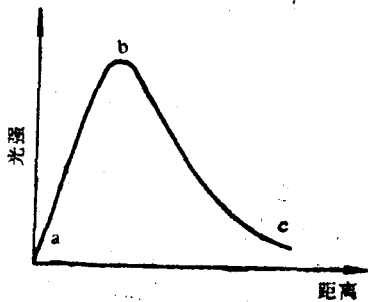


图 1-8 距离—光强特性曲线

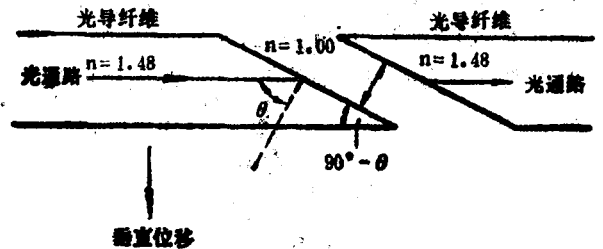


图 1-9 光纤式声压传感器原理图

(二) 压力传感器

光纤式压力传感器可以做成结构型传感器，也可以做成物性型传感器。图 1-9 是声压传感器的原理图。它的主要元件是一根多模光纤，将它以一相对于轴有足够大的角度倾斜分开，然后将断面抛光，以使当两断面间隙之间的介质为空气时，在光纤内传播的全部波可全反

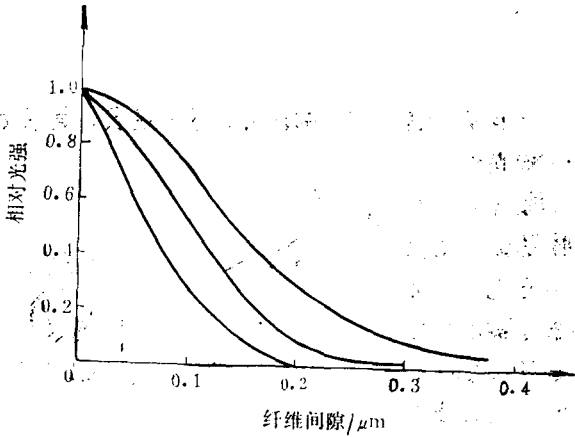


图1-10 间隙—光强特性曲线

射。如果将光纤的两断面靠得足够近，那么很大一部份光能可以在两段光纤之间相耦合。当空气的压力波加在与光纤轴垂直的方向移动的那段光导纤维上时，这一段光纤与另一段光纤将发生相对位移 x ，使间隙宽度 x_0 发生变化，从而调制了两段光纤间耦合的光能。图1-10是光纤端部角度分别为 52° 、 64° 、 76° 时，间隙和光强的关系曲线，这里采用的光源波长 $\lambda=0.63\mu\text{m}$ ，光纤的 $n=1.49$ 。从图中可以看出，即使间隙变化很小（即声压变化不大），而相对光强

却有较大的变化，所以灵敏度是很高的。例如利用这一原理，采用光纤芯径为 $85\mu\text{m}$ 的多模光纤，光纤端部角 $\theta=76^\circ$ ，光源用波长为 $0.63\mu\text{m}$ 的氦氖激光器所组成的传感器，能检测的最小静态位移为 $0.48 \times 10^{-3}\text{nm}$ ，相应地能检测的最小压力为 $1\mu\text{Pa}$ 。

图1-11所示的光纤压力传感器，是利用微弯损耗效应的一种物性型传感器。所谓微弯损耗效应，是光导纤维中的一种特殊光学现象，是指由于光纤的微弯引起输光强度的衰减，利用此效应可制成光强度调制的光纤压力传感器。它的主要元件是一对有波纹的压力板和一根光纤，光纤夹在两片波纹板之间。当上面的波纹板感受压力 P 时，两片波纹压力板产生相对位移，改变光纤的弯曲状态，使

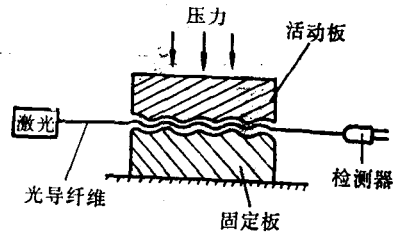


图1-11 光纤压力传感器

传输光强获得调制。这种传感器在 $10\mu\text{m}$ 的动态范围内，可以检测出相当于 0.1nm 微位移的压力。从这种传感器的原理看，它不仅能测量压力，也可以用来测量微位移、应变等参数。

(三) 磁场传感器

各向同性的介质置于磁场中，当线偏振光沿着磁场的方向通过电介质而射出时，光的偏振面将发生旋转。也就是说，由于磁场的作用，介质具有旋光性，这就是法拉第发现的一种磁光效应。光的偏振面旋转角度 θ 与磁感应强度 B 、法拉第效应元件长度 L 成正比，即

$$\theta = VBL \quad (1-4)$$

式中比例常数 V 称为费尔德(Verdet)常数。

利用磁光效应的光纤式磁场传感器的原理图如图1-12所示。在张力作用下，将一根单模光纤绕制在一个镍筒上。检测时，将传感器放置在被测磁场中，由于磁致伸缩效应，这一磁场使通过光纤传播的激光(利用氦氖激光器作光源)的偏振态发生变化。这种方法测量磁场的灵敏度可达 1.76×10^{-2}

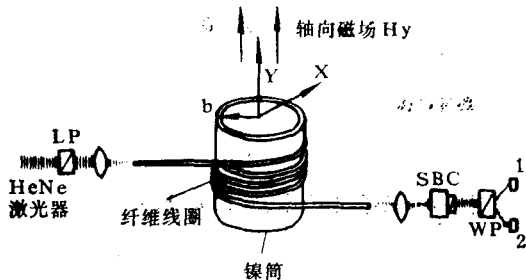


图1-12 光纤式磁场传感器

ad/m-Oe ，每米光纤可检测小至 $4.4 \times 10^{-6}\text{Oe}$ 的磁场。

§1-4 CCD光电传感器

电荷耦合器件(*Charge-Coupled Devices*, 简称 *CCD*)是一种在1970年问世的新型半导体光电器件, 是利用大规模集成电路工艺制作的。这种器件有两个特点: (1)它在半导体硅片上制有成百上千个(甚至上万个)光敏元, 它们按线阵或面阵有规则地排列。当物体通过物镜成象于半导体硅平面上时, 这些光敏元就产生与照在它们上面的光强成正比的光生电荷。(2)它具有自扫描能力, 亦即能将光敏元上产生的光生电荷依次有规则地串行输出, 输出的幅值与对应光敏元上的电荷量成正比。由于它具有集成度高、分辨率高、固体化、低功耗和自扫描能力等一系列优点, 故很快地被应用于工业检测、电视摄像等各个领域。利用 *CCD* 作为检测元件做成的传感器, 就称为 *CCD* 光电传感器。

一、电荷耦合器件

电荷耦合器件分为线阵器件和面阵器件两种。

(一) 电荷耦合器件的基本组成部分

电荷耦合器件的基本组成部分是 *MOS* 光敏元列阵和读出位移寄存器。

图1-13是 *MOS* 光敏元的结构原理图。它是在半导体基片上(如 *p* 型硅)生长一种具有介质作用的氧化物(如二氧化硅), 又在其上沉积一层金属电极, 这样就形成了一个金属—氧化物—半导体结构元(*MOS*)。

从半导体原理知道, 当在金属电极上施加一正电压时, 在电场的作用下, 电极下的 *p* 型硅区域里的空穴被赶走, 从而形成一个耗尽区, 也就是说, 对带负电的电子而言是一个势能很低的区域, 称为“势阱”。如果此时有光线入射到半导体硅片上, 在光子的作用下, 半导体硅片上就产生了电子与空穴, 由此产生的光生电子就被附近的势阱所吸收(或称“俘获”), 而同时产生的空穴则被电场排斥出耗尽区。此时势阱内所吸收的光生电子数量与入射到势阱附近的光强成正比, 人们称这样一个 *MOS* 结构元为 *MOS* 光敏元或叫做一个象素; 把一个势阱所收集的若干光生电荷称为一个电荷包。

通常在半导体硅片上制有几百或几千个相互独立的 *MOS* 元, 如果在金属电极上施加一正电压时, 则在这半导体硅片上就形成几百个或几千个相互独立的势阱。如果照射在这些光敏元上的是一幅明暗起伏的图像,

那么这些光敏元就感生出一幅与光照强度相对应的光生电荷图像, 这就是电荷耦合器件的光电物理效应的基本原理。

图1-14表示了读出移位寄存器的结构原理图。它也是 *MOS* 结构, 亦即由金属电极、氧化物和半导体三部分组成。它与 *MOS* 光敏

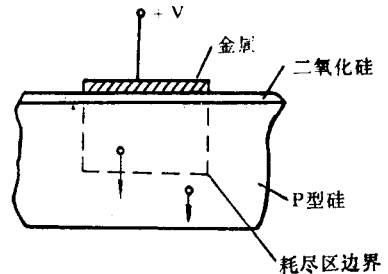


图1-13 *MOS*光敏元

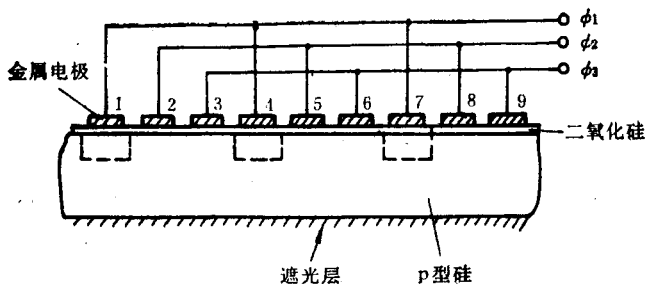


图1-14 读出移位寄存器的结构原理图

元的区别在于：(1)在半导体的底部覆盖上一层遮光层，防止外来光线的干扰；(2)它由3个十分邻近的电极组成一个耦合单元(亦即传输单元)，在这3个电极上分别施加脉冲波 Φ_1 ， Φ_2 ， Φ_3 ，如图1-15所示。

当 $t=t_1$ 时，即 $\Phi_1=V$ ， $\Phi_2=0$ ， $\Phi_3=0$ ，此时半导体硅片上的势阱分布及形状如图1-16a)所示，亦即此时只有 Φ_1 极下形成势阱(如果此时势阱中各自有若干个电荷)。

当 $t=t_2$ 时，即 $\Phi_1=0.5V$ ， $\Phi_2=V$ ， $\Phi_3=0$ ，此时半导体硅片中的势阱分布及形状如图1-16b)所示，即此时 Φ_1 极下的势阱变浅， Φ_2 极下的势阱最深， Φ_3 极下没有势阱。根据势能的原理，原先在 Φ_1 极下的电荷就逐渐向 Φ_2 极下转移。

当 $t=t_3$ 时，如图1-16c)所示， Φ_1 极下的电荷向 Φ_2 极下转移完毕。

当 $t=t_4$ 时，如图1-16d)所示， Φ_2 极下的电荷向 Φ_3 极下转移。

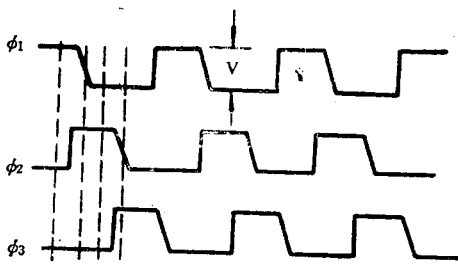


图1-15 波形图

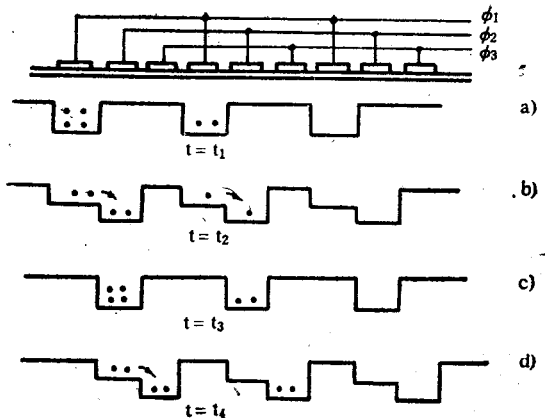


图1-16 电荷传输过程

类似上述的过程，一直可以向后进行转移。

当 $t=t_2$ 时，我们还可以看到，由于 Φ_3 极的存在， Φ_1 极下的电荷只能朝一个方向转移(如图1-16中只能向右转移)。因此 Φ_1 ， Φ_2 ， Φ_3 三个这样结构的电极在三相交变脉冲的作用下，就能将电荷包沿着二氧化硅界面的一个方向移动，在它的末端，我们就能依次接收到原先存储在各个 Φ_1 极下的光生电荷。这就是电荷传输过程的物理效应。

这样一个传输过程，实际上是一个电荷耦合的过程。因此把这类器件称为“电荷耦合器件”。在电荷耦合器件中担任电荷耦合传输的单元，称为“读出移位寄存器”。

(二) 线阵电荷耦合器件

线阵电荷耦合器件是由MOS光敏元列阵、转移栅和读出移位寄存器等部分组成，结构如图1-17所示。如果是一个1024位的线阵器件，那么该器件就由1024个光敏元、1024位的读出移位寄存器和一个转移栅组成。

在光敏元进行曝光(或叫光积分)时，如果在金属极上施加正电压脉冲 Φ_p ，光敏元的势阱就吸收附近的光生电荷。在光积分行将结束时，在转移栅上施加转移脉冲 Φ_{TG} ，并将转移栅打开，此时每个光敏元所俘获的光生电荷就通过转移栅耦合到各自对应的移位寄存器的极下(这是一次并行转移的过程)。接着转移栅关闭， Φ_1 ， Φ_2 ， Φ_3 三相脉冲开始工作，读出移位寄存器的输出端依次输出各位的信息，直至最后一位的信息为止(这是一次串行输出的过