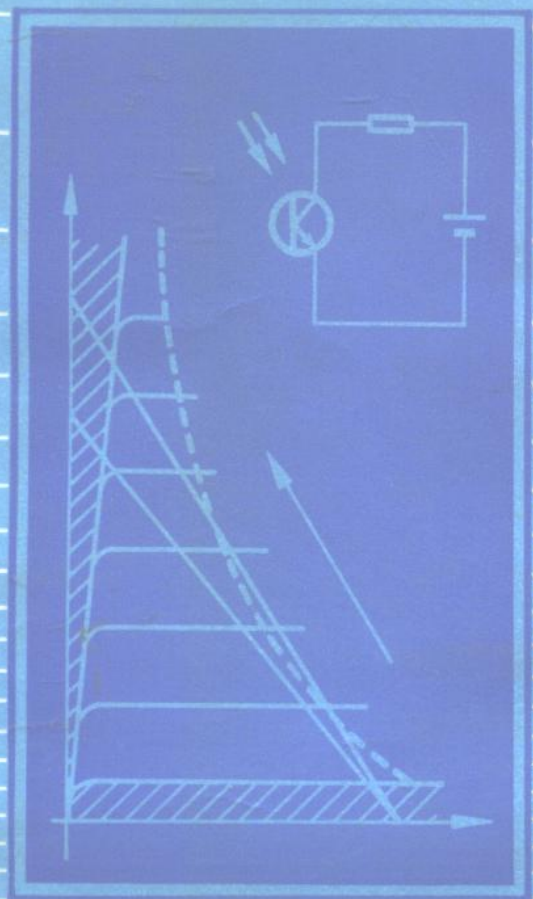


张志鹏

(英) W·A·Gambling

著



# 光纤传感器原理

中国计量出版社

# 光纤传感器原理

张志鹏

著

[英] W. A. Gambling

中国计量出版社

## 内 容 提 要

光纤传感技术是70年代发展起来的新技术。光纤传感器也已普遍用于各种物理量的测量,它具有其它类型传感器无法比拟的优点,在未来的科技领域中占有越来越重要的地位。本书主要介绍光纤传感器的基础知识、原理和应用。全书分九章:1. 概论;2. 光学基础知识;3. 纤维光学基础;4. 特殊光纤;5. 光源;6. 光探测器;7. 光纤传感器原理;8. 光信号检测技术;9. 光纤传感器的应用。每章后均有参考文献。本书序和第四章为国际著名光纤专家、英国南安普敦大学 W.A. Gambling 教授撰写,是首次发表的最新资料。

本书主要作为大专院校专业课教材和教学参考书,也可供检测技术及仪表、电磁测量科技人员、大专院校师生使用。

## 光纤传感器原理

张志鹏

著

[英] W. A. Gambling

责任编辑 王朋植

—

中国计量出版社出版

北京和平里西街甲2号

中国计量出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

—

开本 787×1092/16 印张 15.25 字数 362 千字

1991年9月第1版 1991年9月第1次印刷

印数 1—5500

ISBN 7-5026-0430-8/TB·344

定价 9.50 元

# 前 言

本书致力于光纤传感技术。众所周知，光纤传感器是光、电子技术的新结晶。本书根据光纤传感技术的光电特性，以传统光学为基础引入纤维光学理论、简明光纤传感原理。书中以大量国内、外资料和作者的研究成果介绍光纤传感器的应用，力图反映光纤传感技术的新成果和水平。英国皇家学会会员、世界著名光纤专家、南安普敦（Southampton）大学冈布林（Gambling）教授为本书写了序，并参加编写大纲的讨论和审定，亲自执笔撰写“特殊光纤”一章。

全书共九章。第一章概述了光纤传感技术的产生、发展和新的研究动向。第二、三章简述了光在光纤中传播涉及的光学理论，用射线理论和模式理论分析了阶跃光纤和梯度光纤的性能以及光纤的损耗、色散特性。第四章叙述了适用于光纤传感器的特殊光纤材料、结构和性能。冈布林教授运用大量图片和数据，详细地介绍了他主持研制的具有世界先进水平的双折射光纤、衰减场光纤、掺稀土元素光纤的性能、制造工艺和应用。这是他第一次将这些工艺写入书中。第五、六章介绍了光纤传感系统对光源和光探测器的要求，简述了适用于光纤传感系统的光源和光探测器的工作原理和特性。第七、八章研究了光纤传感器的各种调制和检测原理，介绍了一些实用探头的物理机理和微弱信号检测特点。这两章是本书的重点。第九章按照检测对象介绍光纤传感器的应用。第七、八、九章中的一些内容是作者研究成果。

本书主要为检测技术及仪表、电磁测量的科技人员、大专院校教师、研究生和高年级学生编写的，可作为光纤传感器原理课程的教材。

本书初稿的主要内容曾在“电测与仪表”84、85、86级学生中讲授并收集意见，最后由华中理工大学张志鹏副教授编写定稿。在编写过程中，李少慧同志对全书进行了修订。此外，也吸收了研究生张勤、周冬明、聂一雄、唐晓媛、崇宝欣等同学的研究成果，在此表示谢意。

光纤传感技术是一门多学科技术，理论基础深，应用广泛，作者水平与经验有限，错误和不妥之处在所难免，敬请读者批评指正。

作者

# 序

长距离光纤通信已经发展到了一个很高的阶段，石英光纤在  $0.85\ \mu\text{m}$ 、 $1.3\ \mu\text{m}$  和  $1.55\ \mu\text{m}$  波长时，衰减特性已接近于理论上的极限值。从实用的观点来说，单模光纤在波长为  $1.3\ \mu\text{m}$  以上时可获得无穷大的带宽。因此，人们现在的注意力已从研究一般的通信光纤转向传感器，有源、无源器件和新型光学元件用的特殊光纤的研究。本书致力于研究光纤传感器，这是一个迅猛发展的科学领域，可以预料在不久的将来，它将会在国民经济中发挥巨大的作用。

光纤传感器的种类繁多，在此无法一一列举，下面仅给出几个典型例子加以说明。光纤用于传感或收集光，传感机理可能是光学的或是电学的，传感元件是光纤本身或是其它敏感元件，通过光纤能传输光功率也能传输载有信息的光束。光纤微光束传感器就是其中一例，它通过入射光使微光纤桥产生振荡，经振荡频率调制的光信号沿光纤送到探测器。这种器件可作为一种压力传感器，因为它的振荡频率与周围气体密度有关。这种传感器也是一种用光泵浦的电传感器。

光纤中的模态损耗和相位随弯曲、微弯、压力、拉力、温度以及其它环境因素的变化而变化。虽然，这些因素在光纤通信中可以忽略，但是在特殊设计的光纤中其影响将增加。小数值孔径的光纤在弯曲时损耗增加，随之而来的许多其它影响也相应变化，所以有必要选用适当的材料和结构使光纤获得要求的特性。加入与光正交的电场，通过克尔 (Kerr) 效应可以改变光的相位，根据这一原理可以做成光纤电压传感器。对这种传感器，光纤材料的克尔系数要比石英大。

光纤传感器的一个突出优点是在整个光纤长度上能连续地获得被测量的响应。传统的几百个点传感器阵列可以用一条光纤取代，由数百条电缆、许多二级控制中心和主控制室组成的复杂电气系统也可以由光纤和简单的控制器件实现。分布温度传感器就是这种系统的典型例子，其空间分辨力为几米，精度为  $\pm 1^\circ\text{C}$ 。在这一装置中，与温度有关的局部损耗可由 OTDR (Optical Time Domain Reflectometry) 来决定。

单模光纤的基本模态是线偏振态，因此存在一类测量模态偏振态的传感器。磁场 (电流) 传感器就是最好的例子之一，在这一类传感器中，光的偏振态转角是由沿光纤轴向磁场分量来决定的。如果将光纤绕在载流导线上，那么其偏转角与光纤轴向磁场分量沿光纤长度的线积分成正比。为了获得高的灵敏度，需要控制光纤内部的双折射和外部因素引起的附加双折射。最近，我们已经生产出这种光纤，用它做一个 200 匝、直径为  $1\ \text{cm}$  的电流传感器，其电流测量范围从  $50\ \text{mA}$  到  $500\ \text{A}$ ，其精度达到  $0.2\%$ 。

干涉型传感器用于测量微小相位变化，这一类传感器有多种不同形式。光纤陀螺就是基于萨格纳克 (Sagnac) 干涉仪原理，通过测量多圈光纤环中两束相反方向传播光的相位差变化来决定光纤环的角速度。与机械陀螺相比，它的最大优点是没有活动部件，但是它的灵敏度比机械陀螺差。其它类型的干涉仪通过测量应变而产生的微小相位变化来测量声波、压

强、温度以及其它参数。水听器已经获得了相当于海底背景噪声的灵敏度。由于干涉仪依赖于对两干涉波相差的检测，因此，光束的偏振态必须仔细地加以控制，英国南安普敦大学研究的高双折射光纤恰好满足这种要求。干涉型传感器具有高灵敏度，但动态范围受到限制，需要采取特殊措施。

光纤传感器具有很多优点，它不受电磁辐射的影响，适用于电噪声环境中（如输电线、电气铁路和电气机械中），能避免产生火花，适用于油罐和易爆炸的气体中（如煤矿和石化工业）。光纤由绝缘材料做成，具有很好的电气绝缘性能。光纤电流传感器的吸引力在于它有可能取代现有电力系统中庞大、昂贵的电流互感器，并且有更快的频响。一个简单的光纤分布传感器可以取代大量的单点传感器。光纤本身能在高温下工作，但需要特殊的包层。显然，光纤传感器本身并不需要由电提供功率。

综上所述，人们期待将光纤传感器的独特性能和灵活性广泛用于工业中，但是只有当光纤传感器的价格比现有的传感器便宜或是性能更优越或是其它方法无法进行测量时，才能为人们所接受。虽然现在已经研究了各种各样的光纤传感器，但是今后注意力将集中研究那些有可能是最好的或最便宜的传感器上，只有这样，才能应用到实际中去。

W. A. Gambling

1987.11.27

# 目 录

## 第一章 概 论

§ 1-1 引言 .....	( 1 )
§ 1-2 传感器、光纤传感器 .....	( 2 )
§ 1-3 光纤传感器基本工作原理及分类 .....	( 4 )
§ 1-4 光纤传感器的发展概况及展望 .....	( 5 )
参考文献 .....	( 9 )

## 第二章 光学基础知识

§ 2-1 引言 .....	( 10 )
§ 2-2 几何光学的基本定律 .....	( 10 )
§ 2-3 光的吸收、色散和散射 .....	( 12 )
§ 2-4 光的干涉 .....	( 15 )
§ 2-5 干涉仪 .....	( 22 )
§ 2-6 光的衍射 .....	( 25 )
§ 2-7 光的偏振 .....	( 26 )
§ 2-8 光的双折射 .....	( 28 )
§ 2-9 旋光现象及法拉第旋转效应 .....	( 31 )
参考文献 .....	( 32 )

## 第三章 纤维光学基础

§ 3-1 引言 .....	( 33 )
§ 3-2 光纤的结构和分类 .....	( 33 )
§ 3-3 光在阶跃光纤中的传播 .....	( 36 )
§ 3-4 阶跃光纤中子午光线的分析 .....	( 37 )
§ 3-5 阶跃光纤中斜光线的分析 .....	( 43 )
§ 3-6 光在梯度光纤中的传播 .....	( 45 )
§ 3-7 光纤中模式传播 .....	( 50 )
§ 3-8 阶跃光纤的标量近似分析 .....	( 54 )
§ 3-9 阶跃光纤的矢量分析 .....	( 58 )
§ 3-10 单模光纤的极化特性 .....	( 65 )
§ 3-11 光纤的损耗特性 .....	( 68 )
§ 3-12 光纤的色散特性 .....	( 71 )
参考文献 .....	( 74 )

## 第四章 特殊光纤

§ 4-1 引言 .....	(76)
§ 4-2 双折射光纤 .....	(76)
§ 4-3 衰减场光纤 .....	(85)
§ 4-4 掺稀土元素的光纤 .....	(88)
§ 4-5 结论 .....	(90)
参考文献 .....	(91)

## 第五章 光源

§ 5-1 引言 .....	(92)
§ 5-2 光与物质的相互作用 .....	(92)
§ 5-3 光纤传感器光源特性 .....	(96)
§ 5-4 白炽灯 .....	(97)
§ 5-5 激光器 .....	(98)
§ 5-6 半导体光源 .....	(102)
参考文献 .....	(108)

## 第六章 光探测器

§ 6-1 引言 .....	(109)
§ 6-2 半导体光电二极管 .....	(109)
§ 6-3 光电池 .....	(114)
§ 6-4 光电三极管 .....	(116)
§ 6-5 光电倍增管 .....	(118)
§ 6-6 CCD 阵列探测器 .....	(121)
参考文献 .....	(129)

## 第七章 光纤传感原理

§ 7-1 引言 .....	(130)
§ 7-2 强度调制 .....	(130)
§ 7-3 波长(颜色)调制 .....	(137)
§ 7-4 频率调制 .....	(140)
§ 7-5 相位调制 .....	(141)
§ 7-6 偏振态调制 .....	(148)
§ 7-7 时分调制 .....	(152)
参考文献 .....	(153)

## 第八章 光信号检测技术

§ 8-1 引言 .....	(155)
----------------	-------



§ 8-2	强度检测 .....	(155)
§ 8-3	波长(颜色)检测 .....	(160)
§ 8-4	频率检测 .....	(161)
§ 8-5	光波相位检测 .....	(163)
§ 8-6	光波偏振态检测 .....	(172)
	参考文献 .....	(173)

## 第九章 光纤传感器的应用

§ 9-1	光纤温度传感器 .....	(175)
§ 9-2	光纤压力、振动传感器 .....	(184)
§ 9-3	光纤位移传感器 .....	(189)
§ 9-4	光纤角速度传感器——光纤陀螺 .....	(191)
§ 9-5	光纤应变、弯曲传感器 .....	(196)
§ 9-6	光纤速度、流速传感器 .....	(200)
§ 9-7	光纤加速度传感器 .....	(203)
§ 9-8	光纤磁场传感器 .....	(206)
§ 9-9	光纤电压、电流传感器 .....	(213)
§ 9-10	光纤电磁场传感器 .....	(217)
§ 9-11	光纤光谱传感器 .....	(220)
§ 9-12	光纤放射线传感器 .....	(224)
§ 9-13	光纤图像传感器 .....	(225)
§ 9-14	光纤传感器系统 .....	(227)
	参考文献 .....	(231)

# 第一章 概 论

## §1-1 引 言

现代科学技术的迅猛发展，使人类社会从高度工业化向信息化转变。在信息化时代，人类将主要依靠对信息资源的开发及其变换、传输和处理进行社会活动。传感器是感知、获取、检测和转换信息的窗口，处于研究对象与传输处理系统的接口位置，被比喻为电子计算机实现电脑智能化的“五官”。可以设想，如果没有高度保真和性能可靠的传感器，纵有再好的传输和处理设备也无法发挥作用。因此，传感器是实现信息化时代的主要技术基础。

传感器又被称为“80年代最有代表性的珍品”，目前已广泛应用于国防军工，工、农业生产，环境保护，生物医学，计量测试，交通运输，自动控制 and 家用电器等各个领域。在信息时代，人类的认识和活动范围在空间和时间上将向无限、极端和崭新领域拓展。电子和电脑、空间、海洋、遗传、材料和能源等关键工程的开发，首先就要有能传感各种强、高、弱、微和边缘效应的传感器，这些特殊领域的突破将给人类科学技术带来不可估量的进展，产生巨大的经济效益。因此，传感器是现代科学技术开拓的先鋒。

光纤与激光、半导体光探测器一样，是一种新兴的光学技术，即形成光电子学新的领域是20世纪后半期重大发明之一。以光纤作为信息传输介质的光纤通信，自1970年美国康宁（Corning）玻璃公司制成20 dB/km的光纤以来，得到广泛的重视和发展。短短的十几年就从实验室研究走向实用化，现正在形成产业，社会、经济效益与日俱增。

在70年代中期，人们开始意识到光纤本身可以构成一种新的直接交换信息的基础，无需任何中间级就能把待测的量和光纤内的导光联系起来。自1977年美国海军研究所（NRL）开始执行光纤传感器系统（FOSS）计划以来，光纤传感器的概念在全世界的许多实验室里变为现实。

随着光纤传感器的研制，国际间的学术交流活动日益增多。从1983年起，国际光纤传感器会议（International Conference on Optical Fiber Sensors）定期召开。

光纤传感器如此引人注目，主要是因为光纤传感器是以光学技术为基础，将被敏感的状态以光信号形式取出。光信号不仅人能直接感知，而且，利用半导体二极管诸如光电二极管、雪崩光电二极管、PIN管和发光二极管、激光二极管之类的小型而简单的元件很容易进行光电、电光转换，所以易与高度发展的电子装置匹配，这是光纤传感器的突出优点。

此外，由于光纤不仅是敏感元件而且也是一种优良的低损耗传输线，因此不必考虑测量仪和被测物体的相对位置，从而特别适合于电子传感器等不太适用的地方。

今后，将要开发各种高性能的机器，它们必须适应多种使用环境以及包含智能控制功能。这些机器必然需要适应使用环境、符合使用目的的传感器。可以期待，光纤传感器作为

一个新的技术领域将扩大传感器的研制范围。

目前, 光纤传感器已用于测量温度、压力、振动、位移、速度、磁场、电流、电压、液位、水声、流量、旋转以及辐射等物理量, 各种类型的光纤传感器达百余种。

## §1—2 传感器、光纤传感器

人可以用手准确地拿到放在桌上的书、笔等物, 这是出现于日常生活中的习以为常的现象。人在完成这个过程时, 不可缺少的是大脑的判断和认识对象, 而眼睛为大脑的正确判断和认识提供依据。可以想象, 如果闭上眼睛, 人拿任何物品是多么困难。控制和测量的关系就是这样, 为了有效地达到自动控制, 就需要象眼睛一样的传感器测量被控制对象的一系列信息和对这些信息的正确判断。

众所周知, 实现信息检测、转换和传输的元、器件或装置称为传感器。通常要求传感器要具有如下条件:

1. 有优良的转换功能。工作范围宽, 具有好的线性特性, 检测信号的信噪比高, 重复性好, 时间老化特性优良。
2. 检测信号的质量好。容易作信号处理, 容易传输信号。
3. 与被测体匹配好。对被测体环境适应能力强, 不破坏被测体的状态, 检测信号不受被测体环境的干扰。
4. 体积小、重量轻, 特性偏差小, 故障率低, 价格低廉。

完全满足以上要求的传感器是非常少的。目前, 市场上的传感器有数千种, 正在研制的就更多。为研究方便, 人们常用以下方法将传感器分类:

1. 按工作原理分: 有结构型传感器和物性型传感器。前者主要是利用传感器结构上几何尺寸等的变化来实现检测、转换; 后者则是利用传感器材料的物性变化来实现检测、转换。
2. 按所用的效应分: 有物理传感器、化学传感器及生物传感器。
3. 按人的五官功能分: 有视觉传感器、触觉传感器、嗅觉传感器、味觉传感器及听觉传感器。
4. 按检测对象分: 有温度传感器、湿度传感器、压力传感器、速度传感器、粘度传感器、流量传感器、光传感器、磁场传感器、气体传感器及射线传感器等。
5. 按制作工艺分: 有半导体(平面工艺)、陶瓷(烧结工艺)、薄膜(蒸发、溅射、化学气相沉积工艺)、光纤(拉丝工艺)、超微粒子(粉体工艺)等类传感器。
6. 按所用的功能材料分: 有半导体传感器、陶瓷传感器、金属传感器、高分子物传感器、光纤传感器等。

从以上传感器分类可知, 光纤传感器同半导体传感器、陶瓷传感器、金属传感器、高分子物传感器一样, 是以传感器中的功能材料来命名的, 即: 用光纤作为功能材料的传感器称为光纤传感器。

光纤是70年代为光通信而发展的一种新型材料, 它主要是用玻璃预制棒拉丝成纤维, 外直径仅 $100\sim 150\mu\text{m}$ 。它与其它材料相比, 有许多独特的性能。

光纤的第一个特性是有良好的传光性能。它对光波的损耗目前可低到 $0.2\text{ dB/km}$ , 甚至

更低；若光在光纤里传播 1 km，光强将减小为原来的  $1/1.047$ ，即光强为原来的 96%，传播 15 km 后光强还有原来的一半，可见光强衰减很小。有人比喻说，如果有一根针沉在 10 km 深、透明度和光纤相同的海底，人在海面上可以看得非常清楚，可以想象光纤的透明度是很高的。

光纤的第二个特性是频带宽。这是因为光纤传输的是光，而光的频率特别高，现在所用的光频率在  $10^{14} \sim 10^{15}$  Hz 的范围里，它比微波高 5 个数量级。频率越高，能够容纳的带宽越宽；而其它传输手段只能传输频率低得多的电磁波，即使能够把光送入其它传输线，也由于损耗大而没有实用价值。这是光纤能够同时传输大量信息的根本原因。现在已经达到的实用水平是一条光纤能同时传输 5 760 路电话。正在进行实验、很快就能投入使用的是同时能传输 23 040 路电话，比原来的提高 4 倍。理论上可以传输的路数比它还要大得多，可能是一个天文数字。现在限于光纤的水平，更限于其它元件的水平（例如半导体激光器），使传输信息的容量有限。尽管这样，一条比头发还细的玻璃丝，用那么小的功率（只有几个毫瓦）能够传送几万路电话，甚至还可以多得多，确实不可思议，不愧是一项最新的尖端技术。

光纤的第三个特性是它本身就是一个敏感元件，即光在光纤中传输时，光的特性如振幅、相位、偏振态等将随检测对象发生变化而相应变化。光从光纤射出时，光的特性得到调制，通过对调制光的检测，便能感知外界的信息，这是光纤在光纤通信领域外的应用。为充分发挥光纤的这一特性，自 70 年代中期以来出现了许多特殊光纤，如一种性能能灵敏地随着射线辐照而发生变化的光纤，被用于射线计量仪；在光纤外面涂上一层特殊涂层材料，以提高光纤对外界信息的敏感能力，用于测量磁场；一些特殊断面，如椭圆芯光纤、熊猫光纤、蝴蝶结光纤以及其它特殊用途的红外光纤、紫外光纤、激光光纤、荧光光纤等都已研制成功，有些还进入了商品市场。

光纤同其它材料相比还有电绝缘性能好，不受电磁干扰，无火花，能在易燃、易爆的环境中应用。由于光纤极细，可塑性好，能放置在小孔和缝隙等被测场点，而且对被测场点扰动小。光纤的原材料硅的资源丰富，价格低廉，光纤的应用将以地球上取之不尽的硅取代非常有限的铜、铝等有色金属。

因此，光纤传感器与传统传感器相比具有以下优点：

1. 灵敏度高。
2. 是无源器件，对被测对象不产生影响。
3. 光纤是电介质，耐高压，耐腐蚀，在易燃、易爆环境下安全可靠。
4. 频带宽，动态范围大。
5. 几何形状具有多方面的适应性，可以做成任意形状的传感器和传感器阵列。
6. 在共同的技术基础上可以制成传感不同物理量的传感器。
7. 可以与光纤遥测技术相配合，实现远距离测量和控制。
8. 由光纤传感器组成的光纤传感器系统便于与中心计算机连接，实现多功能、智能化的要求。
9. 传感器体积小、重量轻。

## § 1—3 光纤传感器基本工作原理及分类

光纤传感器的基本原理是将光源的光经光纤送入调制区，在调制区内，外界被测参数与进入调制区的光相互作用，使光的性质如光的强度、波长（颜色）、频率、相位、偏振态等发生变化成为被调制的信号光，再经光纤送入光探测器、解调器而获得被测参数。

目前，研究的光纤传感器按其传感原理分为两类：一类是传光型（或称非功能型）光纤传感器；另一类是传感型（或称功能型）光纤传感器。

在传光型光纤传感器中，光纤仅作为传播光的介质，对外界信息的“感觉”功能是依靠其它物理性质的功能元件来完成的。传感器中的光纤是不连续的，其间有中断，中断的部分要接上其它介质的敏感元件，如图 1—1 所示。调制器可能是光谱变化的敏感元件或其它敏感元件。光纤在传感器中仅起传光的作用。

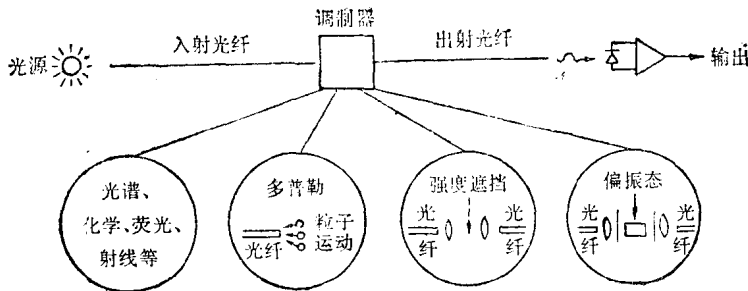


图 1—1

传感型光纤传感器是利用对外界信息具有敏感能力和检测功能的光纤（或特殊光纤）作为传感元件，将“传”和“感”合为一体的传感器。在这类传感器中，光纤不仅起传光的作用，而且还利用光纤在外界因素作用下，其光学特性（如光强、相位、偏振态等）的变化来实现传和感的功能。因此，传感器中光纤是连续的，如图 1—2 所示。

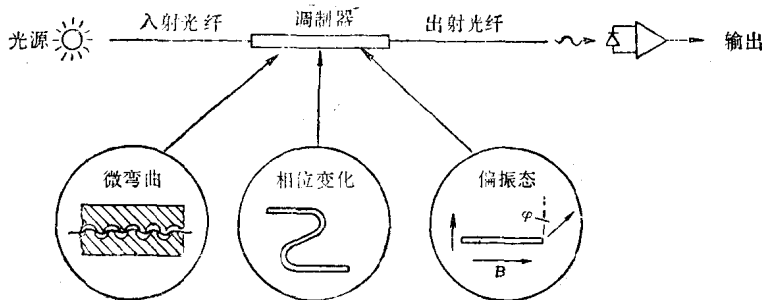


图 1—2

一般来说，传光型传感器主要是利用已有的其它传感技术，它的敏感元件是用别的材料，这样可以充分利用现存的优质敏感元件来提高传感器的灵敏度。而传光用的介质——光

纤仅起传光作用，所以采用通信光纤甚至普通的多模光纤就能满足要求。在已经实用的光纤传感器中，传光型光纤传感器占大多数。

功能型光纤传感器在结构上比传光型光纤传感器简单，因为光纤是连续的，可以减少一些光耦合器件。但为了实现对光纤外界物理量的变化，往往需要采用特殊光纤来作探头，这样就增加了传感器制造的难度。随着对光纤传感器基本原理越来越深入的研究，随着各种特殊光纤的大量问世，高灵敏度的功能型光纤传感器必将得到更广泛的应用。

光纤传感器的分类一般按以下方法：

1. 按光在光纤中被调制的原理分有：光纤强度调制传感器、光纤相位调制传感器、光纤偏振态调制传感器、光纤频率调制传感器和光纤波长调制传感器。

2. 按测量对象分有：光纤温度传感器、光纤位置传感器、光纤流量传感器、光纤力传感器、光纤速度传感器、光纤磁场传感器、光纤电流传感器、光纤电压传感器、光纤图像传感器和医用光纤传感器。

## § 1—4 光纤传感器的发展概况及展望

光纤和光纤通信的问世和发展，引起了各界人士的关注，他们试图将这一新技术成果用到各自的领域。光纤传感器的出现正是这样。

70年代中期，人们开始意识到光纤不仅具有传光特性，且其本身就可以构成一种新的直接交换信息的基础，无需任何中间级就能把待测的量与光纤内的导光联系起来。

1977年，美国海军研究所（NRL）开始执行光纤传感器系统计划，这被认为是光纤传感器问世的日子。从这以后，光纤传感器在全世界的许多实验室里出现。

从70年代中期到80年代中期近10年的时间，光纤传感器已达近百种，它在国防军事部门、科研部门以及制造工业、能源工业、医学、化学和日常消费部门都得到实际应用。从目前的情况看，已有一些形成产品投入市场，也有一些已做成样机进行工业实验，但大量的还是处在实验室研究阶段。几个光纤传感器研究工作开展早的国家情况如下：

目前，美国对光纤传感器研究共有六个方面，这些项目分别是：

1. 光纤传感器系统（FOSS）。这个计划从1977年开始，由美国海军研究所主持，共有5家公司参加，它的主要研究方向是水听器、磁强计和其它水下检测有关设备。

2. 现代数字光纤控制系统（ADOSS）。此计划是采用光纤译码的光纤传感器系统代替直升飞机驾驶员的控制。1980年开始研究，1984年进行飞行试验，最终将实现用光纤的液压传动系统代替电源。

3. 光纤陀螺（FOG）。这是目前进展最快、取得成果最好的领域之一。这个计划很全面，包括从光纤传感器理论研究、部件的制造到实验室模型的演示，以及全袖珍结构的研究等。

4. 核辐射监控（NRM）。这一计划是关于核弹实验中的等离子诊断以及有关光纤对辐射的灵敏度的研究，并为核污染区提供具有遥控的化学传感器。

5. 飞机发动机监控（AEM）。这计划是用光纤将发动机的信息，包括温度、叶尖故障、火焰燃烧、叶片振动和油量等信息送到监控器上，从而对飞机发动机进行监控。

6. 民用研究计划（CRP）。如电力研究所和公用事业用的光纤传感器，实现对电流、磁

场、温度等物理量的监测。

以上计划仅在 1983 年就投资 12~14 亿美元。

美国从事光纤传感器研究的有美国海军研究所、美国宇航局 (NASA)、西屋电气公司、斯坦福大学等 28 个主要单位。美国光纤传感器开始研制最早，投资最大，已有许多成果申请了专利。

英国政府特别是贸易工业部 (DTI) 十分重视光纤传感器技术，早在 1982 年由该部为首成立了英国光纤传感器合作协会 (OSCA)，到 1985 年为止，共有 26 个成员，其中包括 Sira Ltd、中央电气研究所、Delta 控制公司、帝国化学工业公司、英国煤气公司、Taylor 仪器公司、标准电信研究所及几所主要大学。

英国中央电气研究所研制的高压光纤电流测量装置，伦敦大学研究的光纤陀螺、水声器，曼彻斯特大学研制的光纤传感器和无源多路测量系统，牛津大学研究的光全息以及南安普敦大学和 York 公司联合研究的低双折射光纤、高双折射光纤、激光光纤、光学无源器件、光纤测试仪器等都有很高的水平。

1983 年，英国在曼彻斯特举行的欧洲传感器展览会上展出了用于压力、温度、速度测量的传感器，金光纤干涉仪以及适用于危险地区、电磁噪声恶劣的环境作过程控制用的高分辨率长冲程位移传感器。

德国的光纤陀螺的研究规模和水平仅次于美国而居世界第二位，西门子公司早在 1980 年就制成了高压光纤电流互感器的实验样机。法国、瑞士、意大利等国也开展了光纤传感器的研究工作。

日本制定了 1979~1986 年“光应用计划控制系统”的七年规划，投资达 70 亿美元。计划将光纤传感器应用于大型工厂，以解决强电磁场干扰和易燃、易爆等恶劣环境中信息测量、传输和生产全过程的控制问题。

日本有松下、三菱、东京大学等 24 家著名的公司和大学从事光纤传感器研究，从 1980 年 7 月到 1983 年 6 月，申请光纤传感器的专利达 464 件，涉及 11 个领域，其中光纤位移传感器 80 件、光纤气体传感器 65 件。日本松下电器公司生产的光纤电流（磁场）表、光纤电压表和光纤温度计已进入市场。磁场测量范围上限为 4700 Oe，电压上限为 220 V，测量精度都为  $\pm 1\%$ ；温度测量范围为  $-10 \sim +40^\circ\text{C}$ ，测量精度为  $\pm 0.05^\circ\text{C}$ 。

我国光纤传感器的研究工作刚刚开始。1983 年，国家科委新技术局在杭州召开了光纤传感器的第一次全国性会议。目前，研究工作主要在高等院校和研究所。研究的光纤传感器用于测量电流、电压、电场、磁场、温度、水声、压力、位移、速度、转动、应力、液位、浓度、pH 值等物理量，并已取得初步成果。用于光纤传感器的特殊光纤、有源和无源器件等，国内也有单位研制，有的已有产品，有的正在进行或积极筹备进行研制。

我国对光纤传感器的研究极为重视，在“七五”规划中提出了 15 项光纤传感器项目，其中有光纤放射线探测器，光纤位移、位置及角度传感器，光纤压力（水声）传感器，光纤振动、速度、加速度计，光纤温度传感器及温度测量系统，光纤陀螺，光纤磁场传感器，光纤电流、电压传感器，医用光纤传感器，分析用光纤传感器，集成光学传感器，光纤传感器应用系统，光纤传感系统及元、器件的计量测试方法和标准，光纤传感用的有源、无源器件的研制。预计“七五”期间研制成功的品种可达到美、日等国 80 年代初、中期水平。

光纤传感器的发展与光纤通信的发展密切相关，因为光纤通信的许多基础技术和元、器

件如光源、光纤、耦合器、连接器、接收器等都可以用到光纤传感器上，但是，光纤传感器有许多与光纤通信不同的特殊问题，这些问题的研究和解决推动着光纤传感器的发展。

目前，从大量的文献资料中看到光纤传感器的研究有如下的动向：

1. 继续深入研究传感器的理论和技术，解决实用化问题，发展新原理的光纤传感器。

光纤传感器基本原理的研究日益深入，强度、相位调制的传感器更加完善，而对波长调制和时间分辨信息的传感器亦有深入的研究。

传感器用于实际测量的主要问题是长时间漂移效应，人们对此进行了深入研究，提出了许多解决办法。漂移效应来自光纤传输线的衰减、耦合器和分束器特性不完善、光源输出不稳定及探测器的响应等。为了从技术上解决漂移问题，国外对光纤传感头的固有调制形式进行了研究。例如，采用参考光路引入参考信号可解决由于光学结构的漂移特性对测量的影响。对于不同调制方法的传感器有着不同的参考光路。采用参考通道和信号通道的波长多路传输和空间多路传输的先进技术，通过必要的调节，可以确保光纤传感器系统达到完全平衡。无论采用何种方式，在传感头上使用“比较”技术，使光纤传感器获得长时间的稳定，这样，就可以使光纤传感器实用化。

2. 从单一传感器进入到传感器系统的研究，并与微处理机相结合形成光纤遥测系统。

单一光纤传感器的研究已进入实用化阶段，但它无法适用于多参数、多变量的测量，国外对传感器系统进行了大量的研究。

光纤传感器系统的一种形式是采用多路传输的光学无源传感器系统，其核心问题是如何节省光路，寻求可能更有效利用的信息通道，使其能不畸变地更多地传输由各个光纤传感器取得的信息。利用光纤之间、几个无源传感器之间、数据遥测通道之间的多路传输可达到此目的。

多路传输大致有三种基本结构：其一是采用时分多路传输结构。空间上分离的多个光纤传感器用相同的光纤连接在同一无源信号通道上，所有的传感器都被调制成同一光特性（如强度），在工作时间内实现多路传输。这种时分多路传输结构如图 1—3 所示。目前用通用的连接元件在一个信号通道上可连接 10 个光纤传感器。若用光频来对光源进行调制，并采用 0.1 dB 的单模光纤连接器，则一个信号通道上可以连接 150 个以上的光纤传感器，这在军事和工程上都有非常大的应用前景。

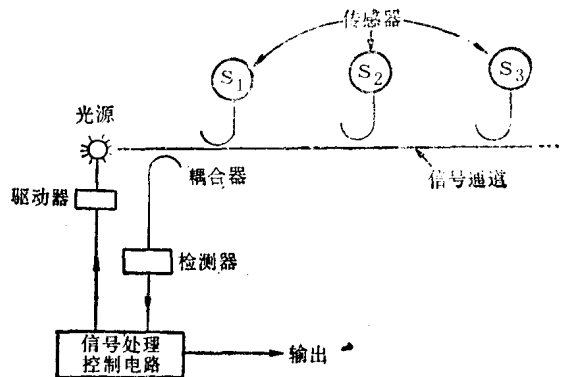


图 1—3



多路传输的另一种结构是正交传播调制的局部多路传输，这一类结构可分为偏振态调制、波长刻度和两个正交干涉等形式，如图 1-4 所示。例如图 1-4 (a) 中，光路的圆双折射是由电流调制的，而线双折射是由电场调制的。因此，这一装置既是光纤电流计又是光纤电压计。这种多路传输系统在国外已用单模集成光学制造，并达到了要求的技术指标，实现了多参数的测量。

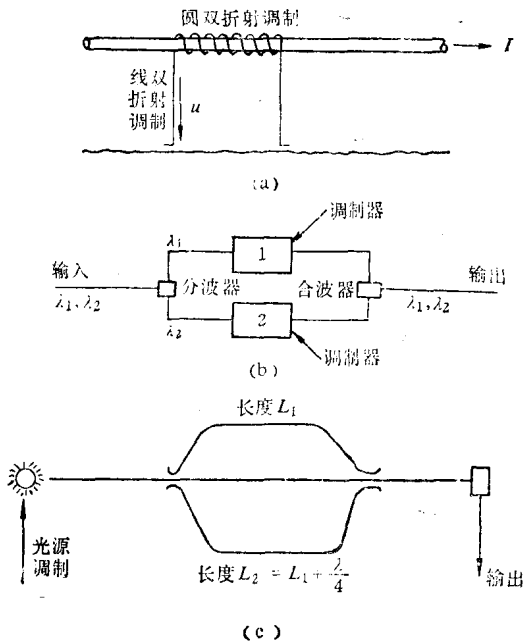


图 1-4

折光光纤（螺旋光纤），椭圆双折光光纤，特殊涂敷光纤，特殊掺杂光纤，特殊芯结构光纤，红外光纤，塑料光纤，传像束等。

随着科学技术的发展，光纤制造工艺不断地改进，可以预测将会出现更多的特殊光纤以满足光纤传感器的需要。

(2) 提高有源和无源器件的稳定性、可靠性。由于近几年来特殊光纤的不断发展，光纤传感器应用的有源、无源器件发展十分迅速，这包括偏振器、耦合器、探测器、光源、连接器以及各种光学器件。如英国 York 公司用高双折光光纤做成的偏振器内径为 24 mm、外径为 36 mm、高为 5 mm，在最佳工作窗口内，消光比为 30 dB。2×2 的耦合器外形尺寸为 70×6×6 mm，重量 10 g，插于损耗小于 0.1 dB，温度范围在 -30~70℃，温度稳定性优于 1%。德国西门子公司最近研制出的一种小巧精致的氮氛激光器重 70 g，直径 25 mm，高 146 mm，功率 0.5 W。国外对半导体激光器，特别是单模 GaAlAs 固体激光器做了深入研究，提高相干长度（谱线宽度），降低其振幅噪声和相位噪声，并经长期实验推定在 0.8~1 μm 波长，其寿命为 10<sup>4</sup> h 以上。发光二极管的研究工作进展迅速，GaAlAs 系列在 0.8 μm、50~60℃ 时，用驱动电流试验推定寿命为数十万小时；InGaSP 系列在 1 μm 推定寿命为 5×10<sup>9</sup> h，比激光二极管要长一个数量级。光电二极管作为光纤传感器的检测器要求其噪声小，国外对雪崩光电二极管 (APD) 和 PIN 光电二极管噪声的减小做了大量的工作，对

多路传输的第三种结构是采用光纤被覆技术，如改变光纤上的被覆层能使声传感器变为磁场或其它类型的传感器，在同一根光纤上采用不同的被覆层构成的多路光纤传感器，将在油田勘探、武器制造和工业控制方面得到广泛应用。

光纤传感器具有与光纤遥测技术的内在相容性的优点，它可以与现有的光纤数据传输组成光纤遥测系统，如用一组光纤液面或流量传感器与遥测装置相结合对易燃、易爆等液面和流量进行检测与控制。

3. 基础技术和元、器件的研究取得了很大进展，可靠性和稳定性有了很大提高。

(1) 开发光纤传感器用的特殊光纤。光纤传感器的种类繁多，应用范围极广泛，因此所要求的光纤的种类不是单一的，而是具有多种不同特性。从现有文献中看到有以下几种：

低双折光光纤（旋光纤），高双折光光纤，圆双