



高等学校电子与通信类专业“十二五”规划教材

# 光纤传感技术

王友钊 黄静 著



西安电子科技大学出版社  
<http://www.xduph.com>

高等学校电子与通信类专业“十二五”规划教材

# 光纤传感技术

王友钊 黄 静 著

西安电子科技大学出版社

## 内 容 简 介

本书系统地介绍了光纤传感器的原理、技术和应用。全书共9章,第1章介绍光纤传感技术的基本概念,包括光纤、光纤传感器件、光纤传感器光学原理和光纤传感器概述;第2章介绍光纤传感器系统;第3~8章介绍六类典型传感器的原理、技术和应用,包括强度调制型光纤传感器、波长调制型光纤传感器、相位调制型光纤传感器、偏振态调制型光纤传感器、分布式光纤传感器和光纤光栅传感器;第9章介绍光纤传感器在温度测量领域的应用。

本书可作为高等院校光纤传感技术、光电子技术、光纤通信和检测技术等专业的本科生和硕士研究生教材,也可供工程技术人员和高校相关专业师生参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

光纤传感技术/王友钊,黄敏等. —西安:西安电子科技大学出版社,2015.3

高等学校电子与通信类“十三五”规划教材

ISBN 978 - 7 - 5606 - 3547 - 7

I. ① 光… II. ① 王… III. ① 传感器—高等学校—教材  
IV. ① TP212.14



中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 033330 号

策划编辑 刘玉芳

责任编辑 毛红兵 任倍萱

出版发行 西安电子科技大学出版社(西安市太白南路2号)

电 话 (029)88242885 88201467 邮 编 710071

网 址 www.xduph.com 电子邮箱 xdupfxb001@163.com

经 销 新华书店

印刷单位 陕西华沐印刷科技有限责任公司

版 次 2015年3月第1版 2015年3月第1次印刷

开 本 787毫米×1092毫米 1/16 印张 12

字 数 280千字

印 数 1~2000册

定 价 22.00元

ISBN 978 - 7 - 5606 - 3547 - 7/TP

**XDUP 3839001 - 1**

\*\*\* 如有印装问题可调换 \*\*\*

# 前 言

光纤作为光的传输介质，以其衰减小、呈现多模和单模传输等优秀性能，自产品化以来，已广泛应用于现代通信技术领域。光纤作为传感器的应用历史并不长，但因其是光通信和集成光学技术发展的结晶，具有灵敏度高、响应速度快、抗电磁干扰、超高压绝缘、阻燃防爆、体积小及可灵活挠曲等优点，加之可以检测到磁、声、力、温度、位移、振动、液位、应变、电流和电压等信息参数，因而发展迅速、潜力巨大，受到多国政府和研究部门的高度重视。随着产品价格日趋合理，光纤传感器已不仅限于单一军事途径应用，现已被应用于电力系统、钢铁冶金和石油化工等各种工业装置和高速铁路、智慧城市等多种技术领域。本书旨在将光纤传感器的原理、技术和应用状况呈现给读者，使读者对光纤传感器有个整体认识，进而借助本书的实例实现对光纤传感器的应用。

本书的基础框架是在浙江大学数字技术所和浙江理工大学现代通信技术联合实验室历经多年的开发实践所积累的大量光纤传感器研发基础上构建的。全书共 9 章，主要内容包括光纤传感技术的基础、光纤传感器系统的组成，以及六类典型光纤传感器的原理、技术和应用。

感谢张江研究生在本书的成稿和校对过程中所付出的大量心血，感谢黄冬、温琪、杨益民研究生对本书涉及的光纤传感器所做的试制和文字工作，感谢浙江大学生物医学工程和仪器科学学院 308 实验室和浙江理工大学信息学院 305 实验室的全体研究生，感谢陆文采对书稿给予的大力支持，谢谢大家的共同努力。

王友钊

2012 年 10 月

# 目 录

<b>第 1 章 光纤传感技术的基本概念</b> .....	( 1 )
1.1 光纤的基本概念 .....	( 1 )
1.1.1 光纤的结构 .....	( 1 )
1.1.2 光纤的分类 .....	( 2 )
1.1.3 光纤的主要特性 .....	( 4 )
1.2 光纤传感器概述 .....	( 4 )
1.2.1 光纤传感器的定义 .....	( 4 )
1.2.2 光纤传感器的分类 .....	( 5 )
1.3 光纤传感器的工作原理 .....	( 8 )
1.3.1 光电/电光效应 .....	( 8 )
1.3.2 磁光效应 .....	( 9 )
1.3.3 声光效应 .....	( 10 )
1.3.4 弹光效应 .....	( 11 )
1.3.5 其他光学效应 .....	( 14 )
1.4 光纤传感器件 .....	( 19 )
1.4.1 光纤连接器 .....	( 19 )
1.4.2 光纤耦合器 .....	( 21 )
1.4.3 波分复用器 .....	( 23 )
1.4.4 光开关 .....	( 24 )
1.4.5 光隔离器 .....	( 26 )
1.4.6 光环行器 .....	( 27 )
1.4.7 光纤光栅 .....	( 29 )
1.4.8 偏振控制器 .....	( 32 )
参考文献 .....	( 33 )
<b>第 2 章 光纤传感系统</b> .....	( 35 )
2.1 光纤传感技术概述 .....	( 35 )
2.1.1 光纤传感器的基本组成及原理 .....	( 35 )
2.1.2 光纤传感器的特点 .....	( 36 )
2.1.3 光纤传感器的研究现状 .....	( 36 )
2.2 光源 .....	( 37 )
2.2.1 发光二极管 .....	( 37 )
2.2.2 激光二极管 .....	( 39 )
2.3 光探测器 .....	( 46 )



2.3.1	光探测器的基本原理	(46)
2.3.2	光探测器的主要特性	(48)
2.4	光纤的耦合技术	(50)
2.4.1	光纤和光源的耦合	(50)
2.4.2	光纤和光纤的直接耦合	(51)
2.4.3	多模光纤通过透镜耦合	(52)
	参考文献	(52)
<b>第3章</b>	<b>强度调制型光纤传感器</b>	(53)
3.1	强度调制传感原理	(53)
3.2	强度调制型光纤传感器的补偿技术	(53)
3.2.1	光桥平衡补偿技术及其改进方法	(54)
3.2.2	双光路法补偿技术	(57)
3.2.3	双波长法(双频法)补偿技术	(58)
3.2.4	Culshaw 网络法补偿技术	(58)
3.2.5	Beheim 网络法补偿技术	(58)
3.2.6	四端网络法补偿技术	(59)
3.3	强度调制型光纤传感器的类型及应用实例	(59)
3.3.1	强度调制型光纤传感器的类型	(59)
3.3.2	强度调制型光纤传感器的应用实例	(67)
	参考文献	(71)
<b>第4章</b>	<b>波长调制型光纤传感器</b>	(73)
4.1	波长调制型光纤传感器的原理和结构	(73)
4.1.1	波长调制型光纤传感器的原理	(73)
4.1.2	波长调制型光纤传感器的结构	(73)
4.2	传光型波长调制光纤传感器的调制方法	(74)
4.2.1	波长调制机理	(74)
4.2.2	光纤 pH 值传感器	(75)
4.2.3	光纤荧光传感器	(75)
4.2.4	光纤黑体温度计	(77)
4.3	波长调制型光纤传感信号的解调方法	(78)
4.3.1	直接解调系统	(78)
4.3.2	窄带激光激励扫描系统	(78)
4.3.3	宽带光源滤波扫描系统	(79)
4.3.4	线性边带滤波法	(80)
4.3.5	干涉解调系统	(81)
	参考文献	(83)
<b>第5章</b>	<b>相位调制型光纤传感器</b>	(84)
5.1	相位调制型光纤传感器和光纤相位调制的原理	(84)
5.1.1	相位调制型光纤传感器的基本原理	(84)

5.1.2 光纤相位调制的基本原理 .....	( 85 )
5.2 光纤干涉仪的类型 .....	( 87 )
5.2.1 迈克尔逊光纤干涉仪 .....	( 87 )
5.2.2 马赫-泽德尔光纤干涉仪 .....	( 88 )
5.2.3 萨格纳克光纤干涉仪 .....	( 89 )
5.2.4 法布里-珀罗光纤干涉仪 .....	( 90 )
5.3 相位调制型光纤传感器的信号解调技术 .....	( 91 )
5.3.1 零差法 .....	( 91 )
5.3.2 $2 \times 2$ 耦合器构成的无源零差解调方法 .....	( 92 )
5.3.3 基于 $3 \times 3$ 光纤耦合器的零差解调法 .....	( 93 )
5.3.4 $2 \times 2$ 和 $3 \times 3$ 耦合器结合的无源零差解调方法 .....	( 94 )
5.3.5 针对振动幅度较大的信号进行相位解调的方法 .....	( 95 )
5.3.6 相位检测中的几个问题 .....	( 98 )
5.4 光纤干涉仪的传感应用实例 .....	( 100 )
5.4.1 迈克尔逊光纤干涉仪的应用举例 .....	( 100 )
5.4.2 马赫-泽德尔光纤干涉仪的应用举例 .....	( 105 )
5.4.3 萨格纳克光纤干涉仪的应用举例 .....	( 107 )
参考文献 .....	( 109 )
<b>第 6 章 偏振态调制型光纤传感器 .....</b>	<b>( 111 )</b>
6.1 偏振态调制型传感原理 .....	( 111 )
6.1.1 弹光效应 .....	( 111 )
6.1.2 Pockels 效应 .....	( 112 )
6.1.3 Kerr 效应 .....	( 112 )
6.1.4 Faraday 效应 .....	( 114 )
6.2 偏振态调制光纤传感器应用实例 .....	( 115 )
6.2.1 光纤电流传感器 .....	( 115 )
6.2.2 BSO 晶体光纤电场传感器 .....	( 116 )
参考文献 .....	( 118 )
<b>第 7 章 分布式光纤传感器 .....</b>	<b>( 119 )</b>
7.1 时域分布式光纤传感器的工作原理 .....	( 119 )
7.1.1 光纤中的后向散射理论 .....	( 120 )
7.1.2 OTDR 技术 .....	( 121 )
7.1.3 瑞利散射型分布式光纤传感技术 .....	( 122 )
7.1.4 基于拉曼散射的分布式光纤传感技术 .....	( 123 )
7.1.5 布里渊散射型分布式光纤传感技术 .....	( 123 )
7.1.6 多种分布式温度传感方法的比较 .....	( 126 )
7.1.7 FBG 和 BOTDR 性能比较 .....	( 127 )
7.2 分布式光纤传感器传感信号的解调方法 .....	( 127 )
7.2.1 前言 .....	( 127 )

7.2.2	FBG 的解调原理	(127)
7.2.3	分布式 FBG 传感器波长检测方法	(128)
7.3	其他(准)分布式光纤传感器——光纤法珀传感器	(132)
7.3.1	光纤法珀传感器的分类及特点	(134)
7.3.2	光纤法珀传感器的复用	(136)
7.4	分布式光纤传感器的应用	(138)
	参考文献	(140)
<b>第 8 章</b>	<b>光纤光栅传感器</b>	<b>(141)</b>
8.1	光纤光栅传感器的原理	(142)
8.2	光纤光栅传感器的特性	(143)
8.2.1	掺锗光纤的紫外(UV)吸收谱	(143)
8.2.2	掺锗光纤的紫外光激折射率变化	(145)
8.2.3	提高光纤光敏性的方法	(146)
8.3	光纤光栅传感器的相关技术	(146)
8.3.1	静态解调方法	(147)
8.3.2	动态解调方法	(150)
8.3.3	光纤光栅传感器网络	(155)
8.3.4	光纤光栅传感网络的复用技术	(156)
8.4	光纤光栅传感器的制作	(165)
8.4.1	横向干涉法	(165)
8.4.2	相位掩模法	(166)
8.4.3	逐点写入法	(167)
8.4.4	相位掩模投影成栅法	(167)
8.4.5	长周期光栅制作法	(168)
8.4.6	啁啾光栅制作法	(168)
8.5	光纤光栅温度传感器	(169)
	参考文献	(175)
<b>第 9 章</b>	<b>光纤传感器在温度测量领域的应用</b>	<b>(176)</b>
9.1	光纤温度传感器测量温度的原理	(176)
9.1.1	光纤温度传感器的原理	(178)
9.1.2	光纤温度传感器应用	(180)
9.2	光纤温度传感器在冶金领域中的应用	(183)
9.2.1	接触式测量	(184)
9.2.2	非接触式测量	(184)
	参考文献	(184)



# 第1章 光纤传感技术的基本概念

## 1.1 光纤的基本概念

### 1.1.1 光纤的结构

光纤的完整名称叫做“光导纤维(Optical Fiber)”，由能传导光波的石英玻璃纤维外加保护层构成。石英玻璃纤维是用纯石英经特殊工艺拉成的细丝，相对于金属导线而言，它具有重量轻、线径细的特点。石英玻璃纤维透明、纤细，虽比头发丝还细，却具有把光封闭在其中并沿轴向进行传播的导波结构，它由折射率较高的纤芯和折射率较低的包层组成，为了保护光纤，包层外往往还覆盖保护层加以保护，其中纤芯的芯径一般为  $50\ \mu\text{m}$  或  $62.5\ \mu\text{m}$ ，而加上包层后直径一般为  $125\ \mu\text{m}$ 。

如上所述，光纤是由纤芯和包层两部分组成的，如图 1-1 所示。纤芯完成光信号的传输；包层则用来将光封闭在纤芯内，保护纤芯，并增加光纤的机械强度。目前，通信光纤的纤芯和包层的主体材料都是石英玻璃，但由于两区域的掺杂情况不同，因而折射率也不同。纤芯的折射率一般是  $1.463\sim 1.467$ （根据光纤的种类而异），包层的折射率一般为  $1.45\sim 1.46$ 。也就是说，纤芯的折射率比包层的折射率稍微大一些。

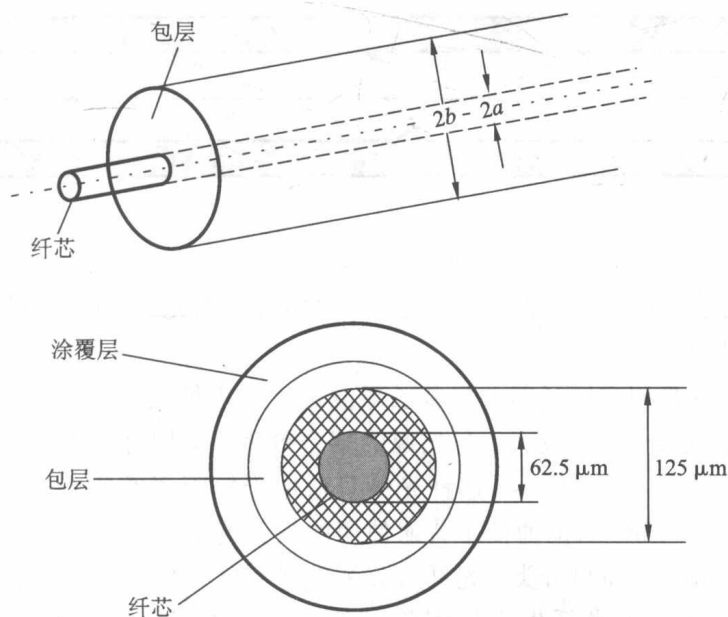


图 1-1 光纤的结构

### 1.1.2 光纤的分类

(1) 按传输模式分类。光纤维传输中的一个重要性能就是模式分布。模式是指传输线横截面和纵截面的电磁场结构图形，即电磁波的分布情况。一般来说，不同的模式有不同的场结构，且每一种传输线都有一个与其对应的基模或主模。根据光纤能传输的模式数目，可将其分为单模光纤和多模光纤。

单模光纤(Single Mode Fiber, 见图 1-2), 就是指在给定的工作波长上只能传输一种模式, 即只能传输主模态的光纤, 其内芯很小, 直径约  $8\ \mu\text{m}\sim 10\ \mu\text{m}$ 。由于只能传输一种模式, 因此可以完全避免模式色散, 使得传输频带很宽, 传输容量很大。这种光纤适用于大容量、长距离的光纤通信, 是未来光纤通信和光波技术发展的必然趋势。

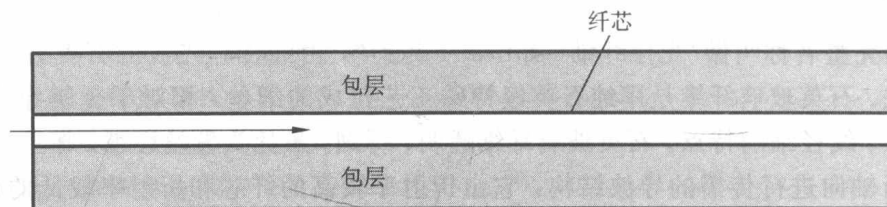


图 1-2 单模光纤

多模光纤(Multi Mode Fiber, 见图 1-3), 是指在给定的工作波长上能以多个模式同时传输的光纤。多模光纤能承载成百上千种的模式。由于不同的传输模式具有不同的传输速度和相位, 因此在长距离的传输之后会产生延时, 导致光脉冲变宽, 这种现象就是光纤模间色散(或模态色散)。由于多模光纤具有模间色散的特性, 可以使得多模光纤的带宽变窄, 降低了其传输容量, 因此仅适用于较小容量的光纤通信。

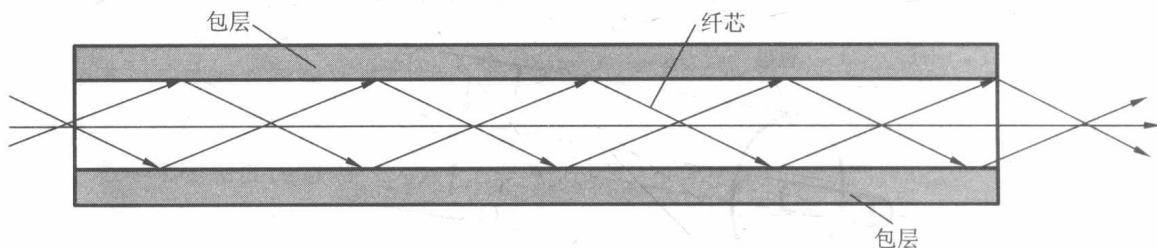


图 1-3 多模光纤

(2) 按材料分类, 光纤可分为石英系光纤、多组分玻璃光纤、塑料包层石英芯光纤、全塑光纤和氟化物光纤等。

其中, 全塑光纤是用高度透明的聚苯乙烯或聚甲基丙烯酸甲酯(有机玻璃)制成的。它的特点是制造成本低廉, 芯径较大, 与光源的耦合效率高, 耦合进光纤的光功率大, 使用方便; 但由于损耗较大, 带宽较小, 这种光纤只适用于短距离低速率通信, 如短距离计算机网链路、船舶内通信等。目前通信中普遍使用的是石英系光纤。

(3) 按最佳传输频率窗口分类, 光纤可分为常规型单模光纤和色散位移型单模光纤。

常规型单模光纤是指光纤生产厂家将光纤传输频率最佳化在单一波长的光上, 如  $1.3\ \text{mm}$  的光色散位移型单模光纤是指光纤生产厂家将光纤传输频率最佳化在两个波长的光上, 如  $1.3\ \text{mm}$  和  $1.55\ \text{mm}$  的光。

常规单模光纤在 1.31 mm 处的色散比在 1.55 mm 处的色散要小得多,这种光纤如工作在 1.55 mm 波长区,虽然损耗较低,但由于色散较大,会给高速光通信系统造成严重影响。

色散位移光纤(DSF)可以对色散进行补偿,使光纤的零色散点从 1.31 mm 处移到 1.55 mm 附近,故这种光纤又称为 1.55 mm 零色散单模光纤,代号为 G653。

G653 光纤是单信道、超高速传输的理想传输媒介,现在已用于通信干线网,特别是用于超高速率、长中继距离的海缆通信系统中。

色散位移光纤虽然是用于单信道、超高速传输很理想的传输媒介,但在用于波分复用多信道传输时,又会由于光纤的非线性效应而对传输信号产生干扰。特别是在色散为零的波长附近,干扰尤为严重。为此,人们又研制出了一种非零色散位移光纤,即 G655 光纤,这种光纤将光纤的零色散点移到 1.55 mm 工作区以外的 1.60 mm 以后或在 1.53 mm 以前,但在 1.55 mm 波长区内仍保持很低的色散。这种非零色散位移光纤不仅可用于现在的单信道、超高速传输,还适应于将来用波分复用扩容,是一种既满足当前需要,又兼顾将来发展的理想传输媒介。

另外,还有一种单模光纤叫色散平坦型单模光纤。这种光纤在 1.31 mm~1.55 mm 整个波段上的色散都很平坦,接近于零。但是这种光纤的损耗难以降低,体现不出色散降低带来的优点,所以目前尚未进入实用化阶段。

(4) 按折射率分布分类,光纤可分为阶跃型和渐变型。

阶跃型光纤是指光纤的纤芯折射率高于包层折射率,使得输入的光能在纤芯与包层的交界面上不断产生全反射而前进。这种光纤纤芯的折射率是均匀的,包层的折射率稍低一些。光纤中心到玻璃包层的折射率是突变的,所以称为阶跃型折射率多模光纤,简称阶跃光纤,也称突变光纤。这种光纤的传输模式很多,各种模式的传输路径不一样,经传输后到达终点的时间也不相同,因而会产生时延差,使光脉冲受到展宽。所以这种光纤的模间色散高,传输频带不宽,传输速率不能太高,通信效果不够理想,只适用于短途低速通信。但单模光纤由于模间色散很小,所以单模光纤都采用突变型。这是研究开发较早的一种光纤,现在已逐渐被淘汰了。

为了解决阶跃光纤存在的弊端,人们又研制、开发了渐变折射率多模光纤,简称渐变型光纤。渐变型光纤是指光纤中心到玻璃包层的折射率逐渐变小,可使高次模的光按正弦形式传播,减少模间色散,提高光纤带宽,增加传输距离,但制造成本较高。现在的多模光纤多为渐变型光纤。渐变型光纤的包层折射率分布与阶跃型光纤一样,是均匀分布的。渐变型光纤的纤芯折射率中心最大,沿纤芯半径方向逐渐减小。由于高次模和低次模的光线分别在不同的折射率层界面上按折射定律产生折射后进入低折射率层中,因此,光的行进方向与光纤轴方向所形成的角度将逐渐变小。同样的过程不断发生,直至光在某一折射率层产生全反射,而使光改变方向,朝中心较高的折射率层行进。这时,光的行进方向与光纤轴方向所构成的角度在各折射率层中每折射一次,其值就增大一次,最后达到中心折射率最大的地方。在这之后和上述完全相同的过程不断重复进行,由此实现了光波的传输。可以看出,光在渐变光纤中会自动地进行调整,从而最终到达目的地,这叫做自聚焦。

(5) 按工作波长分类,光纤可分为短波长光纤、长波长光纤和超长波长光纤。

目前在实际应用中常用光纤的规格：单模的为  $8\ \mu\text{m}/125\ \mu\text{m}$ 、 $9\ \mu\text{m}/125\ \mu\text{m}$ 、 $10\ \mu\text{m}/125\ \mu\text{m}$ ；多模的为  $50\ \mu\text{m}/125\ \mu\text{m}$ (欧洲标准)、 $62.5\ \mu\text{m}/125\ \mu\text{m}$ (美国标准)。

工业、医疗和低速网络： $100\ \mu\text{m}/140\ \mu\text{m}$ 、 $200\ \mu\text{m}/230\ \mu\text{m}$ 。

塑料光纤： $98\ \mu\text{m}/1000\ \mu\text{m}$ (用于汽车控制)。

国际上流行的布线标准 EIA/TIA - 568A 和 ISO 11801 推荐使用三种光纤，即  $62.5\ \mu\text{m}/125\ \mu\text{m}$  多模光纤、 $50\ \mu\text{m}/125\ \mu\text{m}$  多模光纤和  $8.3\ \mu\text{m}/125\ \mu\text{m}$  单模光纤。

### 1.1.3 光纤的主要特性

#### 1. 物理特性

在一般的光纤网络中均采用两根光纤(作用于不同传输方向)组成传输系统。按波长范围(近红外范围内)可分为三种： $0.85\ \mu\text{m}$  短波长区( $0.8\ \mu\text{m}\sim 0.9\ \mu\text{m}$ )、 $1.3\ \mu\text{m}$  长波长区( $1.25\ \mu\text{m}\sim 1.35\ \mu\text{m}$ )和  $1.55\ \mu\text{m}$  长波长区( $1.53\ \mu\text{m}\sim 1.58\ \mu\text{m}$ )。不同的波长范围，光纤的损耗特性也不同，其中， $0.85\ \mu\text{m}$  波长区采用多模光纤通信方式， $1.55\ \mu\text{m}$  波长区采用单模光纤通信方式， $1.3\ \mu\text{m}$  波长区采用多模和单模两种方式。

#### 2. 传输特性

光纤通过内部的全反射来传输一束经过编码的光信号，内部的全反射可以在任何折射指数高于包层媒体折射指数的透明媒体中进行。光纤的数据传输率可达吉比特每秒(Gb/s)级，信号损耗和衰减非常小，传输距离可达数十千米，是长距离传输的理想传输介质。

#### 3. 连通性

光纤普遍用于点到点的链路。由于光纤具有功率损失和衰减小的特性，并且具有较大的带宽潜力，因此一段光纤能够支持的分接头数比双绞线或同轴电缆多得多。

#### 4. 地理范围

从目前的技术来看，光纤可以在  $6\ \text{km}\sim 8\ \text{km}$  的距离内不用中继器传输，因此光纤适合于在几个建筑物之间通过点到点的链路连接局域网络。

#### 5. 抗干扰性

光纤具有不受电磁干扰和噪声影响的特征，适宜在长距离内保持高数据传输率，而且能够提供很好的安全性。

由于光纤通信具有损耗低、频带宽、数据传输率高、抗电磁干扰性强等特点，对高速度、距离较远的局域网也很适用。目前采用波分复用(Wavelength Division Multiplexing, WDM)技术可以在一条光纤上复用多路传输，每路使用不同的波长。

## 1.2 光纤传感器概述

### 1.2.1 光纤传感器的定义

光纤传感器(Optical Fiber Transducer)是利用光导纤维的传光特性，把被测量的变化转换为光特性(强度、相位、偏振态、频率、波长)变化的传感器。光纤传感器的基本工作原理是将来自光源的光经过光纤送入调制器，待测参数与进入调制区的光相互作用后，导致光的光学性质(如强度、波长、频率、相位、偏正态等)发生变化，成为被调制的信号光，再

经过光纤送入光探测器解调，而后获得被测参数。光纤传感器的基本工作原理见图1-4。

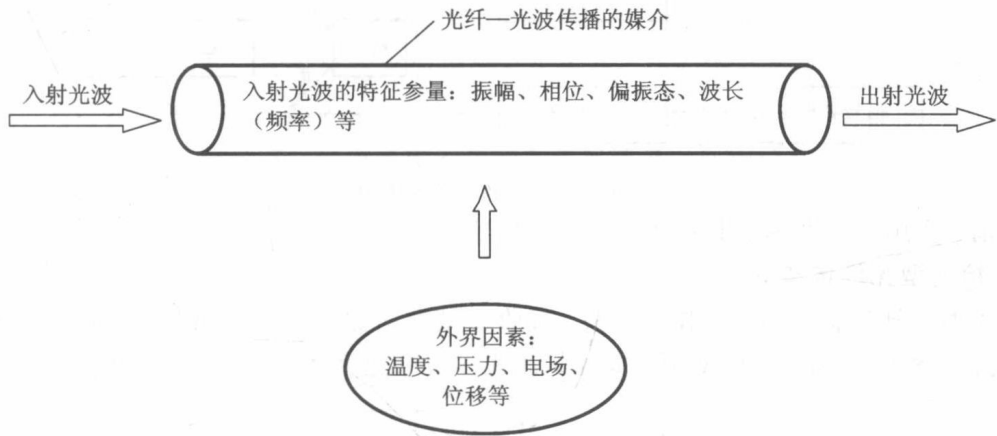


图 1-4 光纤传感器工作原理示意图

## 1.2.2 光纤传感器的分类

光纤传感器技术是最近几年出现的新技术，可以用来测量多种物理量，比如声场、电场、压力、温度、角速度、加速度等，还可以完成现有测量技术难以完成的测量任务。在狭小的空间，强电磁干扰和高电压的环境中，光纤传感器都显示出了独特的能力。根据光纤在传感器中的作用，可以将光纤传感器分为功能型(传感型)传感器、非功能型(传光型)传感器和拾光型传感器三大类。

### 1. 功能型传感器

功能型传感器利用光纤本身的特性把光纤作为敏感元件，对光纤内传输的光进行调制，使传输的光的强度、相位、频率或偏振态等特性发生变化，再通过对被调制过的信号进行解调，得到被测信号，其结构示意图如图1-5所示。在功能型光纤传感器中，光纤不仅是导光媒质，也是敏感元件，光在光纤内会受被测量的调制。

功能型光纤传感器的优点是结构紧凑、灵敏度高；缺点是须用特殊光纤，成本高。其典型应用有：光纤陀螺光纤陀螺、光纤水听器。



图 1-5 功能型传感器结构示意图

### 2. 非功能型传感器

非功能型传感器利用其他敏感元件感受被测量的变化量，光纤仅作为信息的传输介质，常采用单模光纤，其结构示意图如图1-6所示。

非功能型光纤传感器无需特殊光纤及其他特殊技术，比较容易实现，且成本较低，但是，其灵敏度较低。



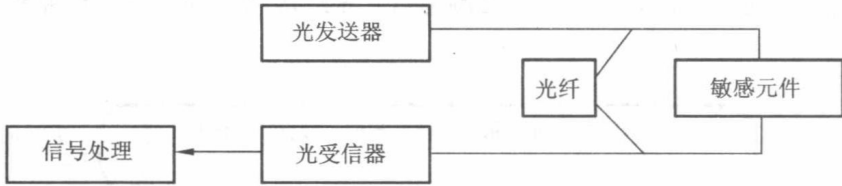


图 1-6 非功能型传感器结构示意图

目前，实用化的大都是非功能型的光纤传感器。

### 3. 拾光型光纤传感器

拾光型光纤传感器用光纤作为探头，接收由被测对象辐射或被其反射、散射的光，其结构示意图如图 1-7 所示。典型例子如光纤激光多普勒速度计、辐射式光纤温度传感器等。

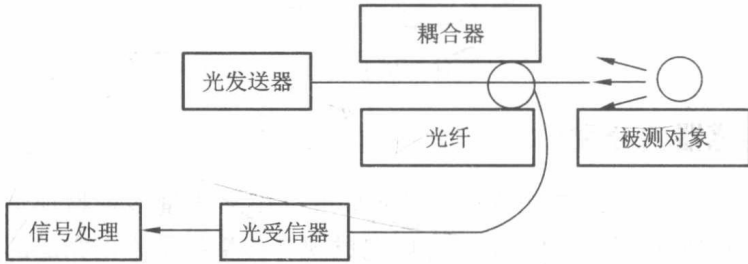


图 1-7 拾光型传感器结构示意图

此外，根据被测对象对光的调制形式，又可以将光纤传感器分为强度调制型光纤传感器、偏振调制型光纤传感器、频率调制型光纤传感器和相位调制型光纤传感器四种类型。

#### 1) 强度调制型光纤传感器

强度调制型光纤传感器是一种利用被测对象的变化引起敏感元件的折射率、吸收或反射等参数的变化，而导致光强度发生变化来实现敏感测量的传感器。可利用光纤的微弯损耗，各物质的吸收特性，振动膜或液晶的反射光强度的变化，物质因各种粒子射线或化学、机械的激励而发光的现象，以及物质的荧光辐射或光路的遮断等来构成压力、振动、温度、位移、气体等各种强度调制型光纤传感器。

这种光纤传感器的结构简单、容易实现、成本低，但受光源强度波动和连接器损耗变化等影响较大。

#### 2) 偏振调制型光纤传感器

偏振调制型光纤传感器是一种利用光偏振态变化来传递被测对象信息的传感器。可利用光在磁场媒质中传播的法拉第效应制成电流、磁场传感器；利用光在电场中的压电晶体内传播的泡克尔斯效应制成电场、电压传感器；利用物质的光弹效应构成压力、振动或声传感器；以及利用光纤的双折射性构成温度、压力、振动等传感器。这类传感器可以避免光源强度变化的影响，因此灵敏度高。

#### 3) 频率调制型光纤传感器

频率调制型光纤传感器是一种利用单色光射到被测物体上反射回来的光的频率发生变化来进行监测的传感器。有利用运动物体反射光和散射光的多普勒效应的光纤速度、流速、振动、压力、加速度传感器；利用物质受强光照射时的喇曼散射构成的测量气体浓度或监测大气污染的气体传感器；以及利用光致发光的温度传感器等。

## 4) 相位调制型传感器

相位调制型传感器的基本原理是利用被测对象对敏感元件的作用,使敏感元件的折射率或传播常数发生变化,从而导致光的相位发生变化,使两束单色光所产生的干涉条纹发生变化,通过检测干涉条纹的变化量来确定光的相位变化量,从而得到被测对象的信息。常见的有利用光弹效应的声、压力或振动传感器;利用磁致伸缩效应的电流、磁场传感器;利用电致伸缩的电场、电压传感器以及利用光纤萨格纳克(Sagnac)效应的旋转角速度传感器(光纤陀螺)等。这类传感器的灵敏度很高。但由于须用特殊光纤及高精度检测系统,因此其成本较高。

近年来,各种传感器都向着精确度高、灵敏度高、适应性强、智能化、小巧的方向发展。在这个快速发展的过程中,光纤传感器这个新成员已经受到了大家的青睐。光纤传感器具有很多独特的优点,例如:它可以在耐腐蚀、耐高温、耐水的环境中工作;可以在对人体健康有害的地方或者是人无法到达的地方使用;它有抗原子辐射和抗电磁干扰的独特性能,而且质量很轻、质地柔软且径细;它可以绝缘,对其他电器没有感应等。

光纤在传感器中发展较晚,但凭借其独特的能力和优异性,得到了普遍认可,并被广泛应用。

表1-1对比了上述各类型的光纤传感器。

表1-1 不同类型光纤传感器的分类比较

传感器		光学现象	被测量	光纤	分类
干涉型	相位调制光纤传感器	干涉(磁致伸缩)	电流、磁场	SM、PM	a
		干涉(电致伸缩)	电场、电压	SM、PM	a
		萨格纳克的效应	角速度	SM、PM	a
		光弹效应	振动、压力、加速度、位移	SM、PM	a
非干涉型	强度调制光纤温度传感器	遮光板遮断光路	温度、振动、压力、加速度、位移	MM	b
		半导体透射率的变化	温度	MM	b
		荧光辐射、黑体辐射	温度	MM	b
		光纤微弯损耗	振动、压力、加速度、位移	SM	b
		振动膜或液晶的反射	振动、压力、位移	MM	b
	偏振调制光纤温度传感器	法拉第效应	电流、磁场	SM	b, a
		泡克尔斯效应	电场、电压、	MM	b
		双折射变化	温度	SM	b
	频率调制光纤温度传感器	多普勒效应	速度、流速、振动、加速度	MM	c
		受激拉曼散射	气体浓度、	MM	b
光致发光		温度	MM	b	

注: MM表示多模; SM表示单模; PM表示偏振保持; a、b、c分别表示功能型、非功能型、拾光型光纤传感器。

## 1.3 光纤传感器的工作原理

### 1.3.1 光电/电光效应

#### 1. 光电效应及其规律

在光(包括不可见光)的照射下,从物体中发射出电子的现象,叫做光电效应。在光电效应中发射出来的电子,叫做光电子。

光电效应有如下规律:

(1) 对任何一种金属,都存在一极限频率。入射光的频率必须大于这个极限频率,才能产生光电效应;

(2) 光电子的最大初动能随着入射光频率的增大而增大,与入射光的强度无关;

(3) 入射光照射到金属上时,光电子的发射几乎是瞬时的(一般不超过  $10^{-9}$  s);

(4) 当入射光的频率大于极限频率时,光电流的强度与入射光的强度成正比。

#### 2. 光电效应方程

(1) 最大初动能。发生光电效应,电子克服金属原子核的引力逸出时其动能大小是不同的。金属表面上的电子吸收光子后逸出时动能的最大值,称为最大初动能。

(2) 逸出功。电子吸收光子的能量后,可能向各个边方向运动,有的向金属内部运动,有的向外运动,由于路程不同,电子逃逸出来时损失的能量也不同,因而它们离开金属表面时的初动能不同。只有直接从金属表面飞出来的电子的初动能最大,这时光电子克服原子核的引力所做的功叫这种金属的逸出功。

(3) 极限频率。对于某种金属,逸出功  $W$  一定,故入射光的频率越大,光电子的最大初动能也越大;若入射光的频率比较低,使得  $h\nu < W$ ,就不能产生光电效应;若  $h\nu = W$ ,这时光子的频率就是发生光电效应的极限频率。不同金属的逸出功不同,故它们的极限频率不同。

(4) 光电效应方程。根据能量守恒定律,光电子的最大初动能跟入射光子的能量  $h\nu$  和逸出功  $W$  的关系为

$$\frac{1}{2}mv_m^2 = h\nu - W \quad (1.3-1)$$

上述方程叫爱因斯坦光电效应方程。式中的  $\frac{1}{2}mv_m^2$  表示最大初动能,  $W$  表示逸出功,  $\nu$  表示入射光频率,  $h\nu$  表示入射光子的能量。

#### 2. 电光效应

在电场作用下,某些各向同性的透明介质变为各向异性,从而使光产生双折射的现象称为电光效应。其中,折射率变化与外加电场成正比的效应称为泡克尔斯效应,又称一阶电光效应或线性电光效应。折射率变化与外加电场的平方成正比的效应称为克尔效应,即二阶电光效应。通常,一阶电光效应比二阶电光效应强很多。本节只介绍一阶电光效应,即泡克尔斯效应的作用。

晶体的两端设有电极,并在两极间加一个电场。外加电场平行于通光方向,这种运用

称为纵向运用或纵向调制。对于 KDP(磷酸二氢钾)类晶体, 晶体折射率的变化  $\Delta n$  与电场  $E$  的关系由下式给定:

$$\Delta n = n_o^3 \gamma_{63} E \quad (1.3-2)$$

其中,  $n_o$  为晶体寻常光折射率,  $\gamma_{63}$  是 KDP 晶体的纵向运用电光系数。

两正交的平面偏振光穿过厚度为  $l$  的晶体后, 光程差为

$$\Delta L = \Delta n \cdot l = n_o^3 \gamma_{63} E l = n_o^3 \gamma_{63} U \quad (1.3-3)$$

其中,  $U = E l$  是加在晶体上的纵向电压。

当折射率变化引起的相位变化为  $\pi$  时, 称此电压为半波电压  $U_{\lambda/2}$ 。晶体的纵向半波电压为

$$U_{\lambda/2} = \frac{\lambda_o}{2n_o^3 \gamma_{63}} \quad (1.3-4)$$

当晶体的通光方向垂直于外加电场时称为横向运用, 这时产生的电光效应称为横向电光效应。晶体中两正交的平面偏振光由于电光效应产生的相位差为

$$\phi = \frac{\pi n_o^3 \gamma_c U}{\lambda_o} \cdot \frac{l}{d} \quad (1.3-5)$$

其中,  $\gamma_c$  是有效电光系数,  $l$  是光传播方向的晶体长度,  $d$  是电场方向晶体的厚度。

晶体的横向半波电压由下式给定:

$$U_{\lambda/2} = \frac{\lambda_o}{2n_o^3 \gamma_c} \cdot \frac{l}{d} \quad (1.3-6)$$

晶体的半波电压与晶体的几何尺寸有关, 通过适当地调整电光晶体的  $d/l$  的比值(称为纵横比), 可以降低半波电压的数值, 这是横向调制的一大优点。

利用泡克尔斯效应可以制作出调制器、光开关等光学器件。

### 1.3.2 磁光效应

一束入射光进入具有固有磁矩的物质内部或者在物质界面反射时, 光波的传播特性, 如偏振面、相位或者散射特性会发生变化, 这个物理现象称为磁光效应。磁光效应是光与具有磁矩的物质相互作用而产生的一系列现象。磁光效应包括法拉第效应、克尔效应、塞曼效应、磁线振双折射等。法拉第效应和克尔效应是研究最多、应用最广的磁光效应。

#### 1. 法拉第效应

1845年, 英国物理学家法拉第发现一束线偏振光沿外磁场方向通过玻璃后, 透射光的偏振面发生了旋转。这是历史上首次发现磁光效应。法拉第效应的大小用法拉第旋转角来描述。光线透射后能使偏振面发生旋转的物质称为旋光物质(如石英晶体、酒石酸溶液等), 旋光物质又有左旋物质和右旋物质之分。当一束光线偏振光沿正反两个方向透射过某旋光物质时, 透射光的偏振面的旋转方向是相反的, 因而旋光物质是一种互易性旋光物质, 一般旋光物质都具有这种特性。而发生法拉第效应的物质其旋转方向与入射光的传播方向无关, 是由磁场的方向决定的, 当光线正反两次透射过该物质时, 透射光的偏振面的偏转角将加倍, 这就是法拉第效应的非互易性。法拉第效应的应用非常广泛, 可用于物质结构的研究和光谱学等领域, 利用法拉第磁光效应原理可制作光隔离器、回转器、磁光开关和环行器等磁光器件。

#### 2. 克尔效应

1877年, 克尔发现铁磁体对反射光的偏振状态也会产生影响, 这就是磁光克尔效应。