

新编《信息、控制与系统》系列教材

Principles and Application Technology of Optical Fiber Sensors

光纤传感原理与应用技术

赵 勇 编著

Zhao Yong

清华大学出版社



新编《信息、控制与系统》系列教材

光纤传感原理与应用技术
Principles and Application Technology
of Optical Fiber Sensors

赵 勇 编著

清华大学出版社
北 京

内 容 简 介

本书围绕光纤传感器涉及的光学原理及光学效应、光纤传感系统的组成、光纤传感器的类型及应用展开讨论,着重介绍了光纤光栅传感器原理、光纤光栅传感网络的信号解调与复用技术、光纤光栅传感器的应用等,最后介绍了新型光纤器件及原理。

本书可作为高等院校光纤传感、光纤通信、光电子技术、精密仪器与光学工程、检测技术等专业的研究生教材,也可供从事相关领域教学和研究人员参考。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13501256678 13801310933

图书在版编目(CIP)数据

光纤传感原理与应用技术/赵勇编著. —北京:清华大学出版社,2007.8

(新编《信息、控制与系统》系列教材)

ISBN 978-7-302-14834-0

I. 光… II. 赵… III. 光纤器件—光电传感器—教材 IV. TP212.14

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 034209 号

责任编辑:王一玲

责任校对:时翠兰

责任印制:孟凡玉

出版发行:清华大学出版社 地 址:北京清华大学学研大厦 A 座

<http://www.tup.com.cn> 邮 编:100084

c-service@tup.tsinghua.edu.cn

社 总 机:010-62770175 邮购热线:010-62786544

投稿咨询:010-62772015 客户服务:010-62776969

印 装 者:清华大学印刷厂

经 销:全国新华书店

开 本:175×245 印 张:21 字 数:442千字

版 次:2007年8月第1版 印 次:2007年8月第1次印刷

印 数:1~3000

定 价:35.00元

本书如存在文字不清、漏印、缺页、倒页、脱页等印装质量问题,请与清华大学出版社出版部联系调换。联系电话:(010)62770177 转 3103 产品编号:019479-01

新编《信息、控制与系统》系列教材 出版说明

信息、控制与系统学科是在 20 世纪上半叶形成和发展起来的一门新兴技术科学。在人类探索自然和实现现代化的进程中,信息、控制与系统学科的理论、方法和技术始终起着重要的和基础的作用。基于信息、控制与系统科学的自动化的发展和应用水平在一定意义上是一个国家和社会的现代化程度的重要标志之一。本系列教材是关于信息、控制与系统学科所属各个领域的基本理论和前沿技术的一套高等学校系列教材。

本系列教材所涉及的范围包括信号和信息处理、模式识别、知识工程、控制理论、智能控制、过程和运动控制、传感技术、系统工程、机器人控制、工业自动化、计算机控制和仿真、网络化系统、电子技术等方面。主要读者对象为自动控制、工业自动化、计算机科学与技术、电气工程、机械工程、化工工程和热能工程等专业有关的高年级大学生和研究生,以及工作于相应领域和部门的科学工作者和工程技术人员。

10 多年前,清华大学出版社同清华大学自动化系,曾经组编出版过一套《信息、控制与系统》系列教材,产生了较大的社会影响,其中多数著作获得过包括国家级教学成果奖和部委优秀教材奖在内的各种奖励,至今仍为国内众多院校所采用,并被广大相关领域科技人员作为进修和自学读物。我们现在组编的这套新编《信息、控制与系统》系列教材,从一定意义上说,就是先前那套教材的延伸和发展,以反映近年来学科的发展和在科学研究与教学实践上的新成果和新进展,以适应当前科技发展和教学改革的新形势和新需要。列入这套新编系列教材中的著作,大多是清华大学自动化系开设的课程中经过较长教学实践而形成的,既有多年教学经验和教学改革基础上的新编著的教材,也有部分原系列教材的更新和修订版本。这套新编系列教材总体上仍将保持原系列教材求新与求实的风格,力求反映所属领域的基本理论和最新进展,力求做到学科先进性和教学适用性统一。需要说明的是,此前我们曾以《信息技术丛书》为名组编这套教材,并已出版了若干种著作。现为使“书”和“名”更为相符,这些已出版的著作将在重印或再版时列入这套新编系列教材。

我们希望,这套新编系列教材,既能为在校大学生和研究生的学习提供内容先进、论述系统和教学适用的教材或参考书,也能为广大科学工作者与工程技术人员的知识更新与继续学习提供适合的和有价值的进修或自学读物。我们同时要感谢使用本系列教材的广大教师、学生和科技工作者的热情支持,并热忱欢迎提出批评和意见。

新编《信息、控制与系统》系列教材编委会

2002 年 6 月

新编《信息、控制与系统》系列教材编委会

顾 问 李衍达 吴 澄 边肇祺 王桂增
主 编 郑大钟
编 委 徐文立 王 雄 萧德云 杨士元 肖田元
张贤达 周东华 钟宜生 张长水 王书宁
范玉顺 蔡鸿程
责任编辑 王一玲

前 言

20 世纪 60 年代,激光使得利用光的各种属性(干涉、衍射、偏振、反射、吸收和发光等)的光检测技术,作为非接触、高速度、高精度的检测手段获得了飞速的发展。

20 世纪 70 年代,由于光纤不但具有良好的传光特性,而且其本身就可用来进行信息传递,无需任何中间媒体就能把测量值与光纤内的光特性变化联系起来,因此,在 20 世纪 80 年代光纤传感器就已显示出广阔的应用前景。但是在当时,光纤传感器真正投入实际应用的却不多,这主要是因为与传统的传感技术相比,光纤传感器的优势是本身的物性特性而不是功能特性。因此,光纤传感技术的重要应用之一是利用光纤质轻、径细、强抗电磁干扰、抗腐蚀、耐高温、信号衰减小、集信息传感与传输于一体等特点,解决常规检测技术难以完全胜任的测量问题。

20 世纪 90 年代后期,光通信带动下的光子产业取得了巨大的成功,光纤传感器呈产业化发展,在国际上形成了五大应用领域,即医学和生物、电力工业、化学和环境、军事和智能结构。

本书从光纤传感器的研究、设计 and 应用角度,系统地介绍和论述光纤传感器技术的基本概念、光纤传感器系统的构成、光纤传感器涉及的各种光学原理和光学效应,使读者对光纤传感器有个清晰的认识和掌握。本书介绍了基于不同调制方式的光纤传感器的类型及其应用,使得读者进一步了解光纤传感器的种类以及不同类型光纤传感器的特点和应用场合,从而完成自己的方案分析和设计。本书后半部分着重介绍了光纤传感器中的新秀——光纤光栅传感器,介绍了光纤光栅传感器原理、信号的解调和复用技术;最后介绍了目前最新发展起来的一些光纤器件及原理。本书内容具有较强的系统性,在注重基础知识和理论介绍的同时,体现了研究型和设计型的特点。在每章的最后,还配有具有讨论

型、设计型和研究型的思考题。这些思考题大多是光纤传感器研究和应用过程中经常遇到的问题,读者思考后会对光纤传感器的概念、技术和应用等有更加清晰的了解和更加深刻的认识。

本书是在清华大学自动化系光纤传感实验室的各位老师、博士后和研究生的共同努力之下完成的,在此,对他们的辛勤工作表示衷心感谢。同时,由于作者水平有限,书中难免有不妥甚至错误之处,恳请读者批评指正。

赵 勇

2006年8月于清华园

目 录

第 1 章 光纤器件及原理	1
1.1 光纤的基本概念	1
1.1.1 光纤的结构.....	1
1.1.2 光纤的材料.....	2
1.1.3 光纤的类型.....	3
1.1.4 光纤的特性.....	4
1.2 传感用光纤器件	5
1.2.1 光纤光栅.....	6
1.2.2 光纤光栅制作方法及传感基础.....	7
1.2.3 光纤耦合器	14
1.2.4 光纤隔离器及环形器	19
1.2.5 光开关	20
1.2.6 波分复用器	29
1.2.7 自聚焦透镜	31
参考文献	34
第 2 章 光纤传感系统	36
2.1 光纤传感系统的组成.....	36
2.2 光纤传感系统中的光源.....	37
2.2.1 半导体激光二极管	38
2.2.2 发光二极管	39

2.2.3	放大自发辐射 ASE 光源	41
2.2.4	可调谐分布反馈(DFB)激光器	42
2.2.5	光纤光栅激光器	43
2.2.6	氦氖(He-Ne)激光器	46
2.3	光纤传感系统中的光电探测器	46
2.3.1	PIN 光电二极管	47
2.3.2	雪崩光电二极管	48
2.3.3	光敏电阻	50
2.3.4	硅光电池	51
2.3.5	硅光电二极管	52
2.3.6	光电位置敏感器件	54
2.4	光纤传感器中光的调制技术	55
2.5	光纤传感技术简介	56
	参考文献	58
第 3 章	光纤传感器中的光学原理及效应	60
3.1	光学反射原理	60
3.2	光学折射原理	61
3.3	光学吸收原理	62
3.3.1	光学吸收原理	62
3.3.2	一般吸收和选择吸收	63
3.3.3	吸收光谱	63
3.3.4	半导体吸收法测量温度的原理	64
3.3.5	光谱吸收法测量成分或浓度	65
3.4	光学多普勒效应	66
3.5	声光效应	66
3.6	磁光效应	67
3.6.1	法拉第效应	68
3.6.2	磁光克尔效应	68
3.6.3	塞曼效应	69
3.6.4	磁致线双折射效应	69
3.6.5	磁光效应的应用	70
3.7	电光效应	71
3.7.1	泡克耳斯效应	71
3.7.2	基于电光效应的光纤电压传感技术	73

3.7.3 一种基于电光效应的光纤电压传感器	76
3.8 弹光效应	77
3.9 Sagnac 效应	78
3.9.1 圆形光路轨道的情况	78
3.9.2 任意形状光路轨道的情况	79
3.9.3 光纤陀螺原理	80
3.10 光声效应	83
3.10.1 液体光声效应的激光激发机制	83
3.10.2 液体光声效应的应用	84
参考文献	85
第4章 光纤传感原理及应用技术	88
4.1 强度调制型光纤传感器技术	88
4.1.1 反射式强度调制	89
4.1.2 透射式强度调制	91
4.1.3 光模式强度调制	93
4.1.4 折射率强度调制	95
4.1.5 光吸收系数强度调制	97
4.2 相位调制型光纤传感器技术	98
4.2.1 光纤相位调制机理	98
4.2.2 光纤相位调制的普通干涉测量	102
4.2.3 光纤相位调制干涉测量的新发展	108
4.2.4 光纤相位解调技术	116
4.3 偏振调制型光纤传感器技术	120
4.3.1 光纤偏振调制的常用物理效应	120
4.3.2 光纤偏振调制机理的典型应用	121
4.4 频率调制型光纤传感器技术	126
4.4.1 光学多普勒效应	127
4.4.2 光纤多普勒传感技术	127
4.5 波长调制型光纤传感器技术	129
4.5.1 光纤 pH 值探测技术	130
4.5.2 光纤荧光探测技术	131
4.5.3 光纤黑体辐射探测技术	132
4.6 分布式光纤传感器技术	134
参考文献	140

第 5 章 光纤光栅传感应用技术	145
5.1 光纤光栅温度传感器	145
5.1.1 用裸光纤光栅传感器对温度进行测量.....	146
5.1.2 对裸光纤光栅封装制成的温度传感器.....	147
5.1.3 带有机机械结构的光纤光栅温度传感器.....	151
5.2 光纤光栅振动与加速度传感器	153
5.2.1 光纤光栅应变测量的基本公式.....	153
5.2.2 悬臂梁和简支梁结构.....	154
5.2.3 光纤光栅振动与加速度传感器.....	157
5.3 光纤光栅压力传感器	165
5.3.1 裸光纤光栅的压力测量.....	165
5.3.2 改进的光纤光栅压力传感器.....	166
5.4 光纤光栅电磁传感器	184
5.5 光纤光栅水声以及液体参数传感器	191
5.5.1 光纤光栅水声传感器.....	191
5.5.2 光纤光栅液体参数传感器.....	194
5.6 光纤光栅碳氢化合物传感器	199
5.7 长周期光纤光栅折射率传感器	204
5.8 光纤光栅扭矩传感器	208
5.8.1 扭矩传感原理.....	208
5.8.2 光纤光栅扭矩传感器结构.....	210
参考文献.....	216
第 6 章 光纤光栅传感信号的解调方法	220
6.1 单光纤光栅传感信号的解调技术	220
6.1.1 复合干涉解调法.....	221
6.1.2 被动式波长比率解调法.....	222
6.1.3 波分复用(WDM)光纤耦合器解调法	223
6.1.4 非平衡 Mach-Zehnder 干涉解调法	224
6.1.5 锁模解调法.....	226
6.1.6 基于光纤 Fabry-Perot 滤波器解调法	227
6.1.7 非平衡扫描迈克尔逊干涉仪解调法.....	228
6.1.8 斜光纤光栅(TFBG)解调法	229
6.1.9 基于波长选择性探测器的解调法.....	230
6.1.10 傅里叶变换谱法	231

6.1.11	FBG 自解调法	231
6.1.12	匹配光纤光栅滤波法	232
6.1.13	波长扫描极值法	233
6.1.14	高折射环形镜边缘滤波法	234
6.1.15	保偏光纤环路调谐法	234
6.2	多光纤光栅分布式传感信号的解调技术	235
6.2.1	CCD 分光计法	236
6.2.2	匹配 FBG 可调滤波检测法	237
6.2.3	可调谐光纤 F-P 滤波器检测法	238
6.2.4	非平衡 M-Z 干涉仪检测法	239
6.2.5	结合时域地址查询技术的非平衡 Michelson 干涉解调检测法	240
6.2.6	可调窄带光源检测法	243
6.2.7	连续波调频技术	244
6.2.8	宽谱光源/副载波检测法	246
6.2.9	可调制激光器解调系统	247
	参考文献	249
第 7 章	光纤光栅传感网络与复用技术	251
7.1	光纤光栅传感网络的概念	251
7.1.1	传感器网络	251
7.1.2	光纤光栅传感网络	251
7.2	光纤光栅传感网络常见的复用技术	252
7.2.1	光纤光栅传感网络的波分复用技术	253
7.2.2	光纤光栅传感网络的空分复用技术	258
7.2.3	光纤光栅传感网络的时分复用技术	260
7.2.4	光纤光栅传感网络的副载波频分复用技术	261
7.2.5	光纤光栅传感网络的相干域复用技术	262
7.2.6	混合复用 FBG 传感网络	263
	参考文献	269
第 8 章	新型光纤器件及原理	271
8.1	光子晶体光纤	271
8.1.1	光子晶体光纤的结构及其导光原理	272
8.1.2	PCF 的特性	273
8.1.3	光子晶体光纤的发展	274

8.1.4	光子晶体光纤光栅	277
8.2	新型塑料光纤	283
8.2.1	塑料光纤的概念和材料	283
8.2.2	塑料光纤的制作方法	284
8.2.3	塑料光纤的特性	284
8.2.4	塑料光纤的新发展与应用	285
8.3	液芯光纤	286
8.4	一些典型的传感用特种光纤	289
8.4.1	特殊处理的石英光纤	290
8.4.2	光纤结构的改变	292
8.4.3	改变光纤的掺杂材料	294
8.5	双轴(保偏)光纤光栅	297
8.5.1	双轴光纤光栅的概念	297
8.5.2	边孔光纤光栅的特性	298
8.6	双包层光纤光栅	301
8.7	变包层光纤光栅	303
8.8	多模光纤光栅	306
8.9	少模光纤光栅	307
8.10	光纤光栅耦合器	309
8.10.1	分离式光纤光栅耦合器	309
8.10.2	融合式光纤光栅耦合器	310
8.11	阶跃变化折射率长周期光纤光栅	312
	参考文献	312
	思考题	316

第 1 章

光纤器件及原理

1.1 光纤的基本概念

1.1.1 光纤的结构

光纤的基本结构十分简单。光纤的纤芯是由折射率比周围包层略高的光学材料制作而成的,折射率的差异引起全内反射,引导光线在纤芯内传播,如图 1-1 所示。纤芯和包层的折射率差并不需要很大,实际上,只要大约 1% 就可以了。在光纤包层的外围,还有一些用于保护光纤的层面和结构,如图 1-2 所示。一般情况下,一根光纤跳线的结构从内到外依次为:1—光纤纤芯,2—光纤包层,3—塑料涂覆层,4—松套管,5—Kevlar 绳(质地牢固且质量轻的纤维),6—聚乙烯护套。不同类型的光纤的纤芯和包层的几何尺寸差别很大。用于高清晰度传像光纤的芯径小、包层薄,传输高功率的照明光纤一般有更粗的纤芯和细薄的包层。相比较而言,用于通信的光纤则是厚包层和小芯径的。通信光纤的标准包层直径是 $125\mu\text{m}$ 。塑料涂覆层的直径约 $250\mu\text{m}$,其作用是保护光纤内部的玻璃表面,

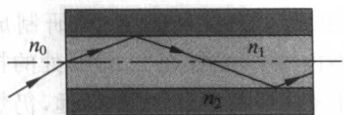


图 1-1 光纤纤芯结构及导光原理

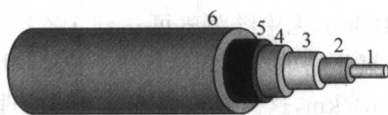


图 1-2 普通单根光纤结构

防止刮痕或其他机械损伤。如图 1-2 中,如果只有 1~3,就是常被称做“裸光纤”的部分; 1~4 一般构成外径是 $900\mu\text{m}$ 的光纤形式,外观的颜色以白色为主,也有黑色、蓝色、红色等颜色;而 1~6 一般构成外径是 2mm 或者 3mm 的光纤形式,外观的颜色一般有黄色和橙色两种。多根光纤以一定的结构形式组合在一起就构成了光纤光缆,其结构如图 1-3 所示。

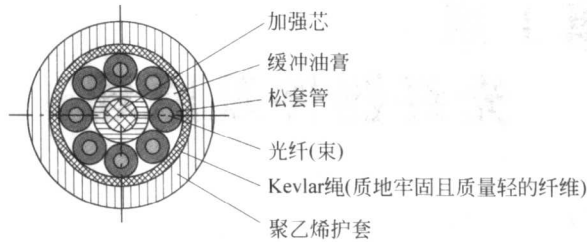


图 1-3 普通光纤光缆结构

1.1.2 光纤的材料

多数光纤是用高纯玻璃制造的,极小的掺杂用于调整光纤的折射率。从化学的角度讲,通信用最纯的光纤材料是纯二氧化硅,即 SiO_2 。医用传像光纤和照明光纤则使用低纯度玻璃制造。还有些光纤是用塑料做成的,虽然没有玻璃光纤那样透明,但是在一些场合显得更灵活易用。少数光纤使用塑料做包层材料,但一般情况下塑料都是作为用于机械保护的外部涂覆层。

以 SiO_2 材料为主的光纤,工作在 $0.8\mu\text{m}\sim 1.6\mu\text{m}$ 的近红外波段,目前所能达到的最低理论损耗在 1550nm 波长处为 0.16dB/km ,已接近石英光纤理论上的最低损耗极限。如果再将工作波长加大,由于受到红外线吸收的影响,衰减常数反而增大。因此,许多科学工作者一直在寻找超长波长($2\mu\text{m}$ 以上)窗口的光纤材料。这种材料主要有两种,即非石英的玻璃材料和结晶材料。晶体光纤材料主要有 AgCl 、 AgBr 、 KBr 、 CsBr 以及 KRS-5 等。目前 AgCl 单晶光纤的最低损耗在 $10.6\mu\text{m}$ 波长处为 0.1dB/km 。因此,需要寻求新型基体材料的光纤,以满足超宽带宽、超低损耗和高码速通信的需要。

氟化物玻璃光纤是当前研究最多的超低损耗远红外光纤,它是以 $\text{ZrF}_4\text{-BaF}_2$ 和 $\text{HfF}_4\text{-BaF}_2$ 两系统为基体材料的多组分玻璃光纤,其最低损耗在 $2.5\mu\text{m}$ 附近为 $1\times 10^{-3}\text{dB/km}$,无中继距离可达到 $1\times 10^5\text{km}$ 以上。1989 年,日本 NTT 公司研制成功的 $2.5\mu\text{m}$ 氟化物玻璃光纤损耗只有 0.01dB/km 。目前 ZrF_4 玻璃光纤在 $2.3\mu\text{m}$ 处的损耗达到 0.7dB/km ,这离氟化物玻璃光纤的理论最低损耗 $1\times 10^{-3}\text{dB/km}$ 相距很远,仍然有相当大的潜力可挖。能否在该领域研制出更好的光纤,对于开辟超长波长的通信窗口具有深远的意义。

硫化物玻璃光纤具有较宽的红外透明区域($1.2\mu\text{m}\sim 12\mu\text{m}$),有利于多信道的复用,而且硫化物玻璃光纤具有较宽的光学间隙,自由电子跃迁造成的能量吸收较少,而且温度对损耗的影响较小,其损耗水平在 $6\mu\text{m}$ 波长处为 0.2dB/km ,是非常有前途的光纤。而且,硫化物玻璃光纤具有很大的非线性系数,用它制作的非线性器件,可以有效地提高光开关的速率,开关速率可以达到数百吉位每秒以上。

重金属氧化物玻璃光纤具有优良的化学稳定性和机械物理性能,但红外性质不如卤化物玻璃好,区域可透性差,散射也大。若把卤化物玻璃与重金属氧化物玻璃的优点结合起来,制造性能优良的卤—重金属氧化物玻璃光纤具有重要的意义。日本 Furukawa 电子公司,用 VAD 气相轴向沉积法(Vapor phase Axial Deposition)工艺制得的 $\text{GeO}_2\text{-Sb}_2\text{O}_3$ 系统光纤,损耗在 $2.05\mu\text{m}$ 波长处达到了 13dB/km ,如果经过进一步脱 OH 的工艺处理,可以达到 0.1dB/km 。

聚合物光纤自 20 世纪 60 年代美国杜邦公司首次发明以来,取得了很大的发展。1968 年杜邦公司研制的聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)阶跃型塑料光纤(SI POF),其损耗为 1000dB/km 。1983 年,NTT 公司的全氟化 PMMA 塑料光纤在 650nm 波长处的损耗降低到 20dB/km 。由于 C-F 键谐波吸收在可见光区域基本不存在,即使延伸到 1500nm 波长的范围内其强度也小于 1dB/km 。全氟化渐变型 PMMA 光纤损耗的理论极限在 1300nm 处为 0.25dB/km ,在 1500nm 处为 0.1dB/km ,有很大的潜力可挖。近年来,Y. KOIKE 等以 MMA 甲基丙烯酸甲酯单体与 TFPMA(四氟丙基丙烯酸甲酯)为主要原材料,采用离心技术制成了渐变折射率聚合物预制棒,然后拉制成 GI POF(渐变折射率聚合物光纤),具有极宽的带宽($>1\text{GHz}\cdot\text{km}$),衰减在 688nm 波长处为 56dB/km ,适合短距离通信。国内有人以 MMA 及 BB(溴苯)、BP(联苯)为主要原材料,采用 IGP 技术成功地制备了渐变型塑料光纤。日本 NTT 公司最近开发出的氟化聚酰亚胺材料(FULPI)在近红外光内有较高的透射性,同时具有折射率可调、耐热及耐湿的优点,解决了聚酰亚胺透光性差的问题,现已经用于光的传输。聚碳酸酯、聚苯乙烯聚合物光纤的研究也在不断发展中,相信在不久的将来,更好性能的聚合物光纤材料将得到开发和利用。

特殊的环境对光纤有特殊的要求。石英光纤的纤芯和包层材料具有很好的耐热性,耐热温度达到 $400^\circ\text{C}\sim 500^\circ\text{C}$,所以光纤的使用温度取决于光纤的涂覆材料。目前,梯形硅氧烷聚合物(LSP)涂层的热固化温度达 400°C 以上,在 600°C 时其光传输性能和机械性能仍然很好。采用冷的有机体在热的光纤表面进行非均匀成核热化学反应(HNTD),然后在光纤表面进行裂解生成碳黑,即碳涂覆光纤。碳涂覆光纤的表面致密性好,具有极低的扩散系数,而且可以消除光纤表面的微裂纹,解决了光纤的“疲劳”问题。

1.1.3 光纤的类型

光纤纤芯和包层的尺寸根据用途不同,有多种类型。如传输图像的光纤要尽可能地

收集到其端面上的光,因此其包层相对于纤芯而言非常薄。在长距离传输过程中,通信光纤的厚包层能避免光束泄漏出纤芯。各种类型的通信会有不同的特殊要求,短距离通信光纤的纤芯较大,能够尽可能地收集光,一般称为多模光纤;长距离通信光纤的纤芯直径一般很小,通常只能传输一个模式,因此称为单模光纤。常见的光纤纤芯/包层尺寸有 $100\mu\text{m}/140\mu\text{m}$, $200\mu\text{m}/240\mu\text{m}$, $50\mu\text{m}/125\mu\text{m}$, $62.5\mu\text{m}/125\mu\text{m}$ 和 $9\mu\text{m}/125\mu\text{m}$ 等。这些光纤的外层一般都用直径为 $250\mu\text{m}$ 的塑料涂覆层加以保护。

此外,还有一些用于特殊场合的光纤,如折射率沿径向逐渐减小的自聚焦光纤棒。不同长度的自聚焦光纤棒具有各种不同的成像作用,还可以用做准直物镜。由于它一般具有较大的数值孔径,还常用于光的耦合。塑料光纤是以光学塑料为材料的一类重要的光学纤维。它具有质量轻、韧性好、对不可见光波透过性好等优点;缺点是耐热性、抗化学腐蚀和表面磨损性能较差,且易潮解。镀金属光纤是外保护层为金属膜的一种专用的传感光纤。这种金属膜保护层是在光纤拉丝过程中同时涂敷上去的,金属膜的厚度一般在微米量级。其主要用途是改善增敏和去敏性能,以满足不同的使用要求,尤其是高性能光纤传感的要求。这种光纤最大的特点是可用于高温环境。此外,还有用于远红外波段的氟化物光纤、具有光放大及产生激光性能的掺杂光纤、具有特殊光学性质的光纤光栅以及空心光纤等。

1.1.4 光纤的特性

一、机械特性

在机械特性方面,光纤坚硬而又弯曲灵活,机械强度极大。细光纤比粗光纤更容易弯曲。单根通信光纤可以弯成直径为5cm的环而不会有任何损伤。和电线不同,光纤被弯曲后还能恢复到原来笔直的形状,但光纤在受到外力牵引时不能一直延伸下去,外力过大会被拉断,断裂前只能延伸到超过初始长度的1%左右。

玻璃纤维的机械强度大得惊人,但是如果光纤布满了表面裂纹,就很容易损伤了。塑料涂覆层的作用就是防止光纤表面受到机械损伤。

二、光学特性

光纤的光学特性取决于它们的结构和成分。一般地,轴对称的单模光纤,可以同时传输两个线偏振正交模式或者两个圆偏振正交模式。若光纤是完全的轴对称形式(几何形状为理想圆,折射率分布均匀),这两个正交模式在光纤中将以相同的速度向前传播,因而在传播过程中偏振态不会变化。实际的光纤由于在一定程度上都会同时存在着非轴对称性和弯曲,因而两个正交模式在传播过程中会发生耦合,其结果一是使得光波的偏振态在