

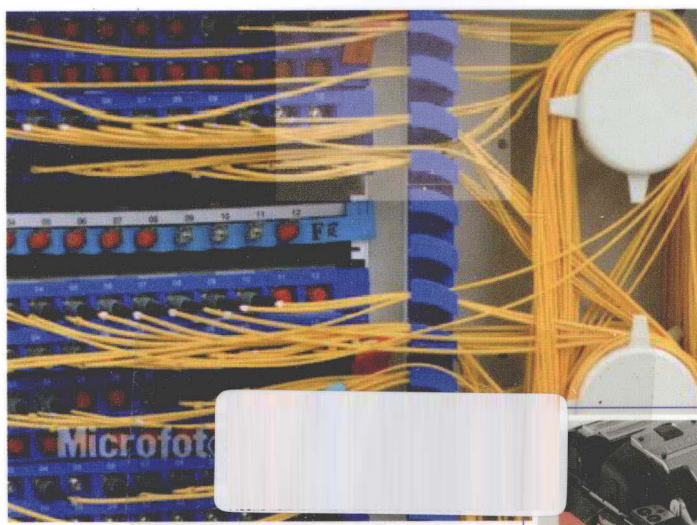


高等学校应用型特色规划教材

# 光纤通信

## 原理与应用

朱宗玖 主编  
谭振建 白志青 副主编



免费赠送电子课件

- ◎ 对光纤通信所涉及的基本原理、基础理论和实践技术进行了较为完整的论述，内容贴近实际工作，具有非常强的实用价值。
- ◎ 对关键技术、一些实践过程中可能遇到的问题进行了简明扼要的介绍，力争做到深入浅出。



清华大学出版社

高等学校应用型特色规划教材

# 光纤通信原理与应用

朱宗玖 主 编

谭振建 白志青 副主编



清华大学出版社  
北 京

## 内 容 简 介

本书对想要快速掌握光纤通信原理与应用的学生而言是一个非常好的选择,它对关键技术的介绍简明扼要,并且对一些实践过程中可能遇到的问题都进行了介绍,如光缆的施工等,但对一些纯理论的公式推导等内容则以概念性的介绍为主,力争做到深入浅出,全书内容都非常贴近光纤通信工程及研究中的实际工作内容,具有非常强的实用价值。

全书共由8章组成,主要内容包括光纤通信概述、光纤与光缆、常用光无源器件、光源和光发射机、光检测器和光接收机、光中继器和光放大器、光纤通信网络以及光纤通信新技术。

本书可以作为通信工程、电子信息工程和光电信息工程等相近专业的本科教学用书和光纤通信的技术培训教材,也可作为一般工程技术人员的参考用书。

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 13701121933

### 图书在版编目(CIP)数据

光纤通信原理与应用/朱宗玖主编;谭振建,白志青副主编.--北京:清华大学出版社,2013  
(高等学校应用型特色规划教材)

ISBN 978-7-302-31352-6

I. ①光… II. ①朱… ②谭… ③白… III. ①光纤通信—高等学校—教材 IV. ①TN929.11

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第012476号

责任编辑:李春明 桑任松

封面设计:杨玉兰

版式设计:北京东方人华科技有限公司

责任校对:周剑云

责任印制:刘海龙

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦A座 邮 编:100084

社总机:010-62770175 邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, [c-service@tup.tsinghua.edu.cn](mailto:c-service@tup.tsinghua.edu.cn)

质 量 反 馈:010-62772015, [zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn](mailto:zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn)

课 件 下 载: <http://www.tup.com.cn>,010-62791865

印 装 者:清华大学印刷厂

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm 印 张:12.25 字 数:296千字

版 次:2013年3月第1版 印 次:2013年3月第1次印刷

印 数:1~3000

定 价:26.00元

---

产品编号:038726-01

# 前 言

光纤通信由于具有损耗低、容量大等特点,现在已经全面应用在中长途的通信干线及各种网络中,已成为现代通信的主要支柱之一,在现代电信网中起着举足轻重的作用。光纤通信作为一门新兴技术,近年来发展速度之快、应用面之广是通信史上罕见的,也是世界新技术革命的重要标志和未来信息社会中各种信息的主要传送方式,并且随着技术进步,光电子器件价格降低、光纤光缆性价比提高,光纤到户、光纤到桌面指日可待。在此背景下,各高校也都纷纷开设光纤通信这门课程,各种教材纷纷出现,然而很多教材由于种种原因不能满足当前的需求,有的教材内容老化、有错漏现象,有的教材把研究阶段的内容当成基础知识介绍,这给教师授课带来不便,为此有必要提供一本既能够满足当前实际需要、又简明扼要介绍目前光纤通信主流内容的教材。

编者在采纳多届本科生和研究生的意见、建议,并听取高职高专院校学生和成人教育学院学员意见的基础上,针对前述一些问题,精心组织编写了本书。本书对光纤通信所涉及的基本原理、基础理论、实践技术进行了较为完整的论述。全书共分8章,主要介绍光纤通信概述、光纤与光缆、常用光无源器件、光源和光发射机、光检测器和光接收机、光中继器和光放大器、光纤通信网络以及光纤通信新技术的相关内容。

本书的第1章及第3章由朱宗玖教授(安徽理工大学)及王亚林老师(淮南联合大学)编写,第2章由白志青老师(淮南联合大学)编写,第4~6章由谭振建老师(南京工程学院)编写,第7章由魏岷老师(南京工程学院)及沈晓波老师(淮南师范学院)编写,第8章由牛园园(安徽理工大学)编写。朱宗玖教授对全书进行了最后的统一修改与定稿。

感谢为本书编写做了许多校对工作的赵敏及牛园园。

由于编者学识有限,书中难免存在不足及疏漏之处,敬请广大读者批评指正。

编 者

# 目 录

<b>第 1 章 光纤通信概述</b> .....1	2.6.2 光纤色散特性的测量 .....25
1.1 光纤通信的发展历史.....1	2.7 光纤的其他特性参数.....25
1.2 光纤通信的系统组成与分类.....3	2.7.1 光纤的机械特性 .....26
1.2.1 光纤通信的系统组成.....3	2.7.2 光纤的温度特性 .....26
1.2.2 光纤通信系统的分类.....4	2.8 光缆结构及光缆施工.....27
1.3 光纤通信的主要特点和应用.....5	2.8.1 光缆的结构 .....27
1.3.1 光纤通信的主要特点.....5	2.8.2 光缆的分类 .....28
1.3.2 光纤通信的应用.....6	2.8.3 光缆的特性 .....30
本章小结.....7	2.8.4 光缆的施工 .....30
习题.....7	本章小结.....33
<b>第 2 章 光纤与光缆</b> .....8	习题.....33
2.1 光纤结构与类型.....8	<b>第 3 章 常用光无源器件</b> .....35
2.1.1 光纤的结构.....8	3.1 光纤连接器.....35
2.1.2 光纤的类型.....9	3.2 光纤耦合器.....36
2.2 光纤的射线理论分析.....11	3.3 光纤波分复用器.....37
2.2.1 从射线理论分析光纤的 导光原理.....11	3.4 光纤光栅.....37
2.2.2 传导模和数值孔径.....12	3.5 其他无源器件.....38
2.3 光纤的波动理论分析.....13	3.5.1 光隔离器 .....38
2.3.1 波动方程和电磁场表达式.....13	3.5.2 光环行器 .....39
2.3.2 特征方程和传输模式.....15	3.5.3 光滤波器 .....40
2.4 光纤的制造工艺简介.....17	3.5.4 光衰减器 .....41
2.4.1 原材料的提取.....17	本章小结.....42
2.4.2 预制棒的熔炼.....17	习题.....42
2.4.3 预制棒的拉丝和涂覆.....19	<b>第 4 章 光源和光发射机</b> .....43
2.4.4 光纤成品的测试.....20	4.1 半导体光源的发光机理.....43
2.5 光纤的损耗特性及其测量.....20	4.1.1 能级的跃迁 .....43
2.5.1 光纤的损耗特性.....20	4.1.2 激光器的一般发光原理 .....44
2.5.2 光纤的损耗特性的测量.....21	4.2 半导体激光器.....47
2.6 光纤的色散特性及其测量.....23	4.2.1 P-N 结半导体激光器的 结构和原理 .....47
2.6.1 光纤的色散特性.....23	4.2.2 半导体激光器工作特性 .....50



4.2.3 其他激光器.....	52	<b>第6章 光中继器和光放大器</b> .....	85
4.3 发光二极管.....	55	6.1 光中继器.....	85
4.3.1 发光二极管的发光机理.....	55	6.2 光放大器概述.....	86
4.3.2 发光二极管工作特性.....	56	6.2.1 光放大器的分类.....	86
4.3.3 半导体光源在系统中的应用.....	57	6.2.2 光纤放大器的重要指标.....	87
4.4 光源的调制.....	57	6.3 掺铒光纤放大器.....	88
4.4.1 光源的直接调制.....	58	6.3.1 工作原理.....	88
4.4.2 光源的间接调制.....	61	6.3.2 掺铒光纤放大器的构成和特性.....	89
4.4.3 调制信号的码型.....	62	6.4 其他光放大器.....	94
4.5 数字光发射机.....	65	6.4.1 掺镨光纤放大器.....	94
4.5.1 数字光发射机的基本组成.....	65	6.4.2 半导体光放大器.....	97
4.5.2 自动功率控制电路.....	66	6.4.3 拉曼光纤放大器.....	98
4.5.3 温度特性和自动温度控制电路.....	67	本章小结.....	102
本章小结.....	69	习题.....	102
习题.....	69	<b>第7章 光纤通信网络</b> .....	103
<b>第5章 光检测器和光接收机</b> .....	70	7.1 概述.....	103
5.1 光检测器.....	70	7.1.1 光纤通信系统的分类.....	103
5.1.1 光电二极管.....	70	7.1.2 数字光纤通信系统的性能指标.....	105
5.1.2 PIN 光电二极管.....	71	7.2 SDH 传输技术.....	107
5.1.3 雪崩光电二极管.....	71	7.2.1 SDH 的产生及特点.....	107
5.2 光检测器的特性.....	72	7.2.2 SDH 的速率与帧结构.....	109
5.2.1 PIN 光电二极管的特性.....	72	7.2.3 SDH 的复用.....	111
5.2.2 雪崩光电二极管的特性.....	73	7.2.4 SDH 网络的拓扑结构与自愈网.....	114
5.3 光接收机.....	75	7.2.5 光纤通信系统设计的考虑与中继距离估算.....	123
5.3.1 光检测器.....	75	7.2.6 SDH 光接口的测试.....	126
5.3.2 放大器.....	75	7.3 光波分复用.....	130
5.3.3 均衡和再生.....	76	7.3.1 光波分复用的概念.....	130
5.3.4 光电集成接收机.....	76	7.3.2 密集波分复用的概念.....	132
5.4 光接收机的噪声.....	76	7.3.3 DWDM 的系统结构.....	132
5.5 误码率和灵敏度.....	78	7.3.4 粗波分复用概念.....	134
5.5.1 误码率.....	78	7.4 光交换.....	135
5.5.2 灵敏度.....	80	7.4.1 空分光交换.....	135
5.5.3 自动增益控制和动态范围.....	83		
本章小结.....	83		
习题.....	84		

7.4.2	时分光交换.....	135	8.2.1	光孤子通信技术的基本原理 .....	166
7.4.3	波分光交换.....	135	8.2.2	光孤子通信技术的新发展 .....	171
7.4.4	ASON.....	136	8.3	光子晶体光纤.....	175
7.5	模拟光纤通信系统.....	139	8.3.1	光子晶体光纤的导光原理 .....	176
7.5.1	调制方式.....	139	8.3.2	光子晶体光纤的特性 .....	177
7.5.2	模拟基带直接光强调制光纤传输系统.....	141	8.3.3	光子晶体光纤的应用 .....	179
7.5.3	副载波复用光纤传输系统.....	149	8.3.4	光子晶体光纤的研究进展 .....	180
	本章小结.....	161	8.4	FTTH 技术.....	181
	习题.....	161	8.4.1	FTTH 的概念 .....	181
<b>第 8 章</b>	<b>光纤通信新技术 .....</b>	<b>162</b>	8.4.2	FTTH 接入技术 .....	181
8.1	相干光通信.....	162	8.4.3	FTTH 的发展现状 .....	184
8.1.1	相干光通信技术的基本原理及发展.....	162	8.4.4	FTTH 的前景分析 .....	185
8.1.2	相干光通信关键技术.....	164		本章小结.....	186
8.2	光孤子通信技术.....	166		习题.....	186
				<b>参考文献 .....</b>	<b>188</b>

# 第 1 章 光纤通信概述

## 【教学目标】

通过本章的学习，了解光纤通信的发展历程，光纤通信系统的基本组成部分及分类，光纤通信的主要特点和应用。

本章首先介绍了光纤通信的历史发展过程，在学生充分了解了光纤通信的发展历史之后，进一步介绍了光纤通信系统的基本组成部分及分类、光纤通信的主要特点和应用。

## 1.1 光纤通信的发展历史

光纤通信在最近的 40 年里有了惊人的发展，可以说是当今所有通信技术中发展最快、应用最广的一项技术，没有光纤通信的发展，就没有今天蓬勃发展的现代通信网络，更没有建立在此之上的各种信息服务，如语音、视频、数据等的快捷传输，然而光纤通信的发展并不是一帆风顺的，它的发展是随着科技的进步才慢慢发展到今天的。

众所周知，人类目前传输信息的主要手段是利用电磁波，电磁波的频谱很宽，光也是一种电磁波，光波位于电磁波频率较高的频段。对大多数通信系统来说，系统的信息传输能力是需要优先考虑的，通信系统传输能力的主要限制可由著名的香农公式界定，即如果信息源的信息速率  $R$  不大于信道容量  $C$ ，那么，在理论上存在一种方法可使信息源的输出能够以任意小的差错概率通过信道传输。可以严格地证明，在被高斯白噪声干扰的信道中，传送的最大信息速率  $C$  由下述香农公式确定，即

$$C = B \log_2(1 + S/N)$$

式中： $C$  为信道容量； $B$  为信道带宽，(Hz)； $S$  为信号功率； $N$  为噪声功率。

香农公式说明信息传输能力与信道带宽成正比(信道带宽就是信号传输时该信道没有使信号受到明显衰减的频率范围)。而信道的带宽与载波的频率成正比。带宽与载波之间的经验估算规则是：带宽大约是载波信号的 10%。如果一个微波信道使用 10GHz 的载波信号，那么其带宽约为 100MHz，而光的频率范围是 100~1000THz，根据上述经验估算规则可以看出，单根光纤的带宽可达 50THz。那么，既然光纤通信具有大的信息传输能力，为什么还会落后于传统的微波、同轴等系统，而后来者居上呢？这还要追溯到 20 世纪初。我们知道，在第二次世界大战中，由于需要能够对敌人飞机和舰船进行探测和定位的高分辨的雷达，因而大大促进了微波系统的发展，在当时，微波工程和雷达工程几乎是同一概念，即使在今天，各种类型的雷达仍然广泛应用在军事及民用等领域。后来，微波发展到另外一个重要方向即微波接力通信系统。微波波长在厘米量级，在无线传输中，由于微波波长具有一定长度，对微小的雨雪天气中的雨雪等颗粒具有绕射能力，因此它在微波中继接力系统中做点对点的通信具有许多优点，同时，借助于天线系统，微波可以具有很强的方向性，而且由与微波波长较短，天线尺寸可以较小(对天线而言，天线尺寸与波长应该相当，才具





有更好的发射及接收效果), 信道带宽较宽, 因而在光纤通信发展起来之前, 无线的微波接力及有线的微波系统在中长距离的通信系统中有广泛应用, 包括微波卫星电路系统以及海底微波越洋通信系统等。

那么光通信呢? 事实上, 人类利用光通信的历史也早在几千年前就已经出现在中国, 最著名的是万里长城上的烽火台, 城上每隔 5 里设一个报警烽火台, 若发现来犯敌人, 白天燃烟, 夜间举火, 告诉城内军民。1880 年, 亚历山大·贝尔发明了世界上第一个光电话, 它以弧光灯作光源, 光投射在话筒的音膜上, 当音膜按照说话人声音的强弱及音调不同而作相应的振动时, 从音膜上反射出来的光也随之变化。这种被调制的光通过大气传播一段距离后, 再被硅光电池接收变成电信号, 电信号再来驱动话筒, 从而完成语音的传递。上述两种光信号的传输介质都是大气, 若遇到雨雪天气, 它们的信号传递效果都将变差甚至中断, 具体原因显然是由于光波长较短, 对大气中的雨雪及尘埃物质不具有绕射作用, 光波被这些微粒物质阻挡。

在大气光通信暴露出上述缺点以后, 人们曾经尝试将光路建立在类似于微波波导管中的方法来克服上述大气传输中的雨雪天气等问题, 如反射镜波导方案及透镜波导方案等, 但由于上述方案系统复杂、造价昂贵、施工调试困难等而无法实际应用。1950 年, 现代光纤的雏形——导光用的玻璃纤维出现, 但传输损耗高达 1000dB/km, 即在 1km 的光纤上传输损耗达  $10^{100}$  倍, 这个损耗太大, 显然不能满足通信需要, 因此它仅仅用在医疗领域里的内窥镜系统中等。

1966 年, 当时工作于英国标准电信研究所的英籍华人高锟博士深入研究了光在石英玻璃中的严重损耗问题, 发现损耗的主要原因是玻璃中含有铬、铁、铜等金属离子和其他杂质, 以及光纤拉制工艺中的不均匀性, 它还发现一些玻璃纤维在红外光区的损耗较小。同年 7 月, 高锟和他的同事 A. G. Heckhom 等发表了著名的论文《介质纤维表面光频波导》, 首次提出实用型光纤的制造问题及其在通信上的应用前景。他指出如能将光纤中过渡金属离子减少到最低限度, 并改进制造工艺, 有可能使光纤损耗降低很多, 达到实用要求。正因为他的这一成就, 使得高锟博士赢得了 2009 年度的诺贝尔物理学奖。

在高锟理论的指导下以及巨大的商机引领下, 许多公司开展了此方面的研究工作。1970 年美国的康宁玻璃公司拉制出了世界上第一根损耗为 20dB/km 的光纤。同年, 贝尔实验室研制成室温下可以连续工作的半导体激光器, 这是一种适合于光纤通信的理想光源。从此, 光纤通信中的两项关键技术——低损耗传输介质及理想光源, 得以解决, 此后, 光纤通信开始快速发展, 各国及各大公司相继投入大量人力物力开展光纤通信的研发及应用工作。

1975 年, 第一个点到点的光纤通信系统现场实验在贝尔实验室完成了。1983 年最早的城市间光纤链路在纽约和华盛顿之间敷设完成。随后美国很快敷设了东西干线和南北干线, 穿越 22 个州, 光缆总长达 50000km; 1983 年日本敷设了纵贯日本南北的光缆长途干线, 全长 3400km, 初期传输速率为 400Mb/s, 后来扩容到 1.6Gb/s。1988 年完成了第一条横穿大西洋的海底光缆通信系统, 全长 6400km。第一条横跨太平洋的 TPC-3/HAW-4 海底光缆通信系统于 1989 年建成, 全长 13200km。到 1999 年年底, 据不完全统计, 已经有大约一亿两千万公里的光纤在全世界敷设。

那么国内的光纤通信的发展又经历了哪些艰苦历程呢? 1973 年, 在世界上, 光纤通信

尚未实用。当时我国正处于十年动乱时期，处于封闭状态。国外技术基本无法借鉴，什么都要靠自己摸索，包括光纤、光电子器件和光纤通信系统。就研制光纤来说，原料提纯、熔炼车床、拉丝机，还包括光纤的测试仪表和接续工具也全都要自己开发，困难极大。武汉邮电科学研究院以及中国电子科技集团第八研究所，考虑到保证光纤通信最终能为经济建设所用，开展了全面研究，除研制光纤外，还开展光电子器件和光纤通信系统的研制，使我国至今具有了完整的光纤通信产业。由于采用了正确的技术路线，使我国在发展光纤通信技术上少走了不少弯路，从而使我国光纤通信在高新技术中与发达国家有较小的差距。

1978年改革开放后，光纤通信的研发工作大大加快。上海、北京、武汉和桂林都研制出光纤通信试验系统。1982年邮电部重点科研工程“八二工程”在武汉开通。该工程被称为实用化工程，要求符合国际 CCITT 标准，从此中国的光纤通信进入实用阶段。在 20 世纪 80 年代中期，数字光纤通信的速率已达到 144Mb/s，可传送 1980 路电话，超过同轴电缆载波系统。于是，光纤通信作为主流被大量采用，在传输干线上全面取代电缆。经过国家“六五”、“七五”、“八五”和“九五”计划，中国已建成“八纵八横”干线网，连通全国各省区市。现在，光纤通信已成为中国通信的主要手段。在国家科技部、计委、经委的安排下，1999年中国生产的 8×2.5Gb/s WDM 系统首次在青岛至大连开通，随之沈阳至大连的 32×2.5Gb/s WDM 光纤通信系统开通。2005年 3.2Tb/s 超大容量的光纤通信系统在上海至杭州开通，是当时世界容量最大的实用线路。

目前，中国已建立了一定规模的光纤通信产业。中国生产的光纤光缆、半导体光电子器件和光纤通信系统能供国内建设，并有少量出口，但在光纤行业的核心技术之一——光纤预制棒的生产方面还显落后。有人认为，我国光纤通信主要干线已经建成，光纤通信容量达到万亿比特每秒(Tb/s)量级，几乎用不完，再则 2000 年的 IT 泡沫，使光纤的价格跌到谷底，几乎无利可图，因此悲观的人以为光纤通信发展到了尽头。但信息产业的发展属性决定，光纤行业仍然有较大的发展空间，如新型光纤的研制等(如光子晶体光纤)。实际上，特别是中国，农村地区仍有许多空白需要建设；3G移动通信网的建设也需要光纤网来支持；随着宽带业务的发展、网络需要扩容等，光纤通信仍有巨大的市场。现在每年光纤通信设备和光缆的销售量都是逐步上升的。

## 1.2 光纤通信的系统组成与分类

### 1.2.1 光纤通信的系统组成

光纤通信系统是以光纤作为传输介质、光波作为载波的通信系统。它主要由光发射机、光纤、光中继器、光放大器、光接收机等组成，如图 1.1 所示。当然，一般系统中还包括一些连接器、隔离器、波分复用器、耦合器等器件。

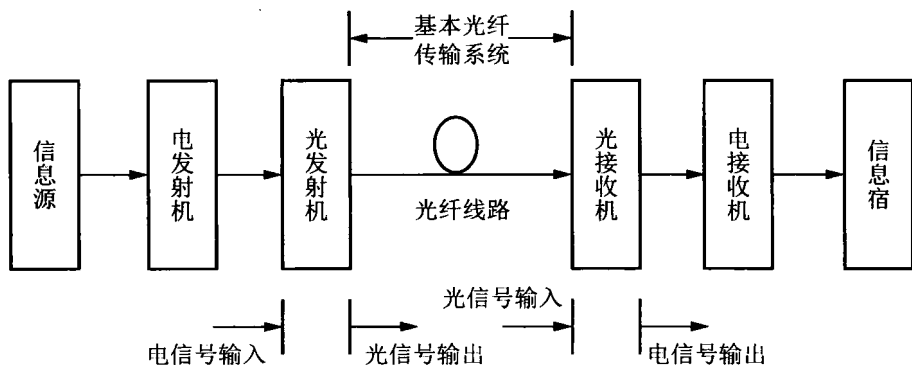


图 1.1 通信系统的基本组成(单向传输)

光发射机的作用是将电信号转换成光信号，并通过连接器将光信号注入光纤。光发射机主要由驱动电路、光源等构成。

光接收机的主要作用是将光纤传输过来的光信号转换成发射端的电信号，它一般包括光电检测器及一些信号处理电路。

光纤的作用是将光信号以尽可能小的衰减及畸变传输到对端。

中继器的作用是延长光信号的传输距离，分为光/电/光中继器和光中继器(或称光放大器)两种。光/电/光中继器是将经过长途传输损耗了的、有畸变的光信号转换为电信号，并对电信号进行再定时、整形、再生，然后将再生的电信号再转换为光信号再送入光纤。光中继器(光放大器)无需进行光/电/光的转换，直接对光信号进行放大。由于光中继器(光放大器)在连续使用后，虽然能够保持信号强度，但信号的畸变不能消除，因此，一般在连续使用几个光放大器后，要使用一个光/电/光中继器进行再定时和整形。

## 1.2.2 光纤通信系统的分类

按照不同的分类方法，光纤通信系统可以分为不同的类别。

根据光纤的传导模式的不同，光纤通信系统可以分为多模光纤传输系统及单模光纤传输系统。多模光纤传输系统是以多模光纤作为传输介质的光纤通信系统，由于多模光纤存在模式色散等，因此其主要应用在传输距离较短、容量较小的系统中。单模光纤通信系统是以单模光纤作为传输介质的光纤通信系统，它的传输距离较长、容量较大，广泛应用于长途及大容量的通信系统中。

按照调制信号的类型，光纤通信系统可以分为模拟光纤通信系统和数字光纤通信系统。模拟光纤通信系统的调制信号为模拟信号，主要应用于广电部门的视音频传输系统。数字光纤通信系统的调制信号为数字信号，它具有定时再生功能，因而具有传输质量好、传输距离远等优点，目前的电信网络中以及计算机网中的光纤传输系统都属于此类系统。

按照系统的工作波长，可以将光纤通信系统分为短波长光纤通信系统及长波长光纤通信系统。通常指的短波长光纤通信系统是工作波长位于  $0.85\ \mu\text{m}$  附近的光纤通信系统，由于光纤在此波长的损耗较大(相对于  $1.31\ \mu\text{m}$  及  $1.55\ \mu\text{m}$ )，传输距离短，因而仅在光纤通信发展的初期，由于此波段的光源及光检测器性价比较好等原因才得以应用，现在已经逐渐被淘汰。长波长光纤通信系统的工作波长位于  $1.31\ \mu\text{m}$  及  $1.55\ \mu\text{m}$  附近，这是光纤的两个

低损耗窗口，长波长光纤通信系统也是目前普遍采用的光纤通信系统，其损耗较低、中继距离长。

根据系统的调制方式，光纤通信系统可以分为直接调制光纤通信系统和间接(外)调制光纤通信系统。直接光纤调制系统是用输入电信号直接调制光源，具有设备简单等优点，因此在低速率传输系统中广泛应用。间接(外)调制光纤通信系统是将电信号加在某些电光晶体的两端，使电光晶体的某些特性受到调制，当光信号通过电光晶体时，间接受到电信号的调制，这种调制系统适用于较高速率的传输系统。

以上是比较常用的几种分类方法，实际上还会有许多种分类方法，此处不再赘述。

## 1.3 光纤通信的主要特点和应用

### 1.3.1 光纤通信的主要特点

光纤通信之所以发展如此迅速是与它具有的一系列特点分不开的，主要体现在以下几个方面。

#### 1. 频带宽、信息容量大

如前所述，光纤的传输带宽很宽，若将低损耗及低色散区做到  $1.45\sim 1.65\mu\text{m}$  范围，则相应的带宽可达几十万亿赫兹。

#### 2. 损耗低、传输距离长

目前，在光纤的低损耗窗口之一的  $1.55\mu\text{m}$  波长处，商用光纤的损耗已经可以做到  $0.25\text{dB/km}$ ，这是以往任何形式的传输线都无法达到的一个指标。损耗低，意味着无中继传输距离远。现在的强度调制、直接检测光纤通信系统的无中继传输距离可以达到几十到上百公里。

#### 3. 体积小、重量轻、便于敷设

目前，通用裸光纤的外径为  $125\mu\text{m}$ ，即使是套过塑料的光纤外径也小于  $1\text{mm}$ ，加之光纤的材料为石英玻璃，相对密度轻于金属，成缆后的光缆重量也轻。涂覆后的光纤具有很好的柔韧性，成缆后，各种结构的光缆可架空、埋地或置入管道，相对于同样容量的电缆系统而言，体积、重量、敷设方便等方面都具有很多优势。

#### 4. 抗干扰性好、保密性强、使用安全

光纤光缆的密封性好，载波为光波，不易受到各种低频电磁波的干扰，具有很强的抗电磁干扰能力。光波在光纤结构的纤芯中传播，不容易受到类似于电缆形式的搭接，因而保密性好。光纤材料是石英，具有耐高温、耐腐蚀的特点，可工作于各种恶劣的工作环境。

#### 5. 材料资源丰富

通信电缆的主要材料是稀有金属铜，其资源较为匮乏。光纤的主体材料是  $\text{SiO}_2$ ，材料



资源极为丰富。

### 1.3.2 光纤通信的应用

每次当你拿起话机通话、看电视、利用传真机收发文件、上网、刷信用卡、利用自动柜员机为您服务时，实际上都离不开光纤通信系统。前面已经大概描述了光纤通信的发展历程，但是确切地说出光纤通信的大发展阶段也是不太容易的事情，因为这个行业一直在不断发展的过程中，整个系统的性价比在不断提高，促使过去许多不熟悉或不敢用(担心其昂贵的建设及维护费用)此系统的业主也纷纷开始使用光纤通信系统。一般来讲，可以认为 20 世纪 90 年代早期是第一次大规模使用光纤网络开始，此后几乎所有的通信公司都将光纤作为主要的中长距离传输介质，每年敷设的光纤长度几乎是以指数形式在增长。

如前所述，光纤可以传输数字信号，也可以传输模拟信号。光纤在通信网、计算机网、广播电视网及其他数据传输系统中，都得到了广泛应用。光纤宽带干线传输网和接入网发展迅速，是光纤通信应用的主要方面之一。总体而言，光纤通信的各种应用可概括如下。

(1) 通信网，包括全球通信网(如横跨大西洋和太平洋的海底光缆和跨越欧亚大陆的洲际光缆干线)、各国的公共电信网(如我国的国家一级干线、各省二级干线和县市以下的支线)、各种专用通信网(如电力、铁路、国防等部门通信、指挥、调度、监控的光缆系统)、特种情况下的通信手段(如石油、化工、煤矿等部门易燃、易爆环境下使用的光缆，以及飞机、舰船、导弹等内部的光缆系统)。

(2) 计算机局域网和广域网，如光纤以太网、路由器之间的光纤高速传输链路。

(3) 有线电视网的干线和分配网中目前也大量使用光纤链路；许多工厂、矿山、银行、交通部门、公安部门、飞机场、港口码头中广泛使用的有线电视系统也大量使用光纤作为传输手段；此外，许多自动控制系统中的数据传输为了避免受到电磁干扰等，也大量使用光纤传输系统。

(4) 综合业务光纤接入网，可以实现电话、数据、视频(包括会议电视、可视电话等)及各种多媒体业务的综合接入，这是目前其他电缆系统无法比拟的，可以提供各种各样的社区服务，是光纤通信未来的发展方向之一。

那么当前光纤通信的主流发展方向在哪里呢？首先值得一提的是光的波分复用技术，波分复用技术在早期主要是指几个波段之间的复用技术，如 1310nm 和 1550nm 之间，后来发展到密集波分复用技术(DWDM)。光的波分复用技术是当今光纤通信技术中最为活跃的一个领域，它的技术进步极大地推动光纤通信事业的发展，给传输技术带来了革命性的变革。波分复用当前的商业水平是 273 个或更多的波长，研究水平是 1022 个波长(能传输 368 亿路电话)，近期的潜在水平为几千个波长，理论极限约为 15000 个波长(包括光的偏振模色散复用，OPDM)。其次是光放大技术，光放大器的开发成功及其产业化是光纤通信技术中的一个非常重要的成果，它大大地促进了光复用技术、光孤子通信及全光网络的发展。顾名思义，光放大器就是放大光信号。在此之前，传送信号的放大都是要实现光电变换及电光变换，即 O/E/O 变换。有了光放大器后就可直接实现光信号放大。光放大器主要有 3 种：光纤放大器、拉曼放大器及半导体光放大器。光纤放大器就是在光纤中掺杂稀土离子(如铒、铥、镨等)作为激光活性物质。每一种掺杂剂的增益带宽及其位置是不同的。掺铒光纤

放大器的增益带较宽,覆盖 S、C、L 频带;掺铒光纤放大器的增益带是 S 波段;掺镨光纤放大器的增益带在 1310nm 附近。而拉曼光放大器则是利用拉曼散射效应制作成的光放大器,即大功率的激光注入光纤后,会发生非线性效应——拉曼散射。在不断发生散射的过程中,把能量转交给信号光,从而使信号光得到放大。由此不难理解,拉曼放大是一个分布式的放大过程,即沿整个线路逐渐放大的。其工作带宽可以说是很宽的,几乎不受限制。这种光放大器已开始商品化了,不过相当昂贵。半导体光放大器(SOA)一般是指行波光放大器,工作原理与半导体激光器相类似。其工作带宽是很宽的,但增益幅度稍小一些,制造难度较大。这种光放大器虽然已实用化,但产量很小。

到此,光纤通信技术的重大进展已如上述,至于光纤通信技术的发展方向,可以概括为两个方面:一是超大容量、超长距离的传输与交换技术;二是全光网络技术。

## 本章小结

(1) 光纤通信系统是以光纤作为传输介质、光波作为载波的通信系统。它主要由光发射机、光纤、光中继器、光放大器、光接收机等组成。一般系统中还包括一些连接器、隔离器、波分复用器、耦合器等器件。

(2) 按照不同的分类方法,光纤通信系统可以分为不同的类别。

(3) 根据光纤的传导模式的不同,光纤通信系统可以分为多模光纤传输系统及单模光纤传输系统;按照调制信号的类型,光纤通信系统可以分为模拟光纤通信系统和数字光纤通信系统;按照系统的工作波长,可以将光纤通信系统分为短波长光纤通信系统及长波长光纤通信系统;根据系统的调制方式,光纤通信系统可以分为直接调制光纤通信系统和间接(外)调制光纤通信系统。

(4) 光纤通信的特点主要有频带宽、信息容量大,损耗低、传输距离长,体积小、重量轻、便于敷设、抗干扰性好、保密性强、使用安全及材料资源丰富。

## 习 题

1. 简述光纤通信的特点。
2. 简述光纤通信系统的基本组成部分及其重要作用。
3. 查阅相关资料,简述当前光纤研究的一些最新技术。

## 第 2 章 光纤与光缆

### 【教学目标】

通过本章的学习，首先要了解光纤和光缆的结构和类型，要理解光纤的导光原理，同时要了解光纤和光缆的制造工艺，理解光纤传输特性的两个重要指标(损耗与色散)及其测量方法，对光缆的施工也要了解。

本章首先简要介绍了光纤的结构和类型，接着分析了光纤的导光原理(光纤的射线理论和波动理论)，最后分析了光纤的相关特性和光缆的结构特点，简述了光纤线路施工的一些注意事项。

### 2.1 光纤结构与类型

#### 2.1.1 光纤的结构

光纤是由纤芯和包层同轴组成的双层或多层的圆柱体的细玻璃丝。光纤的外径一般为  $125\sim 140\mu\text{m}$ ，芯径一般为  $3\sim 100\mu\text{m}$ 。光纤是光纤通信系统的传输介质，其作用是在不受外界干扰的条件下，低损耗、小失真地传输光信号。

光纤主要由纤芯和包层组成，最外层还有涂覆层和套塑。其结构如图 2.1 所示。

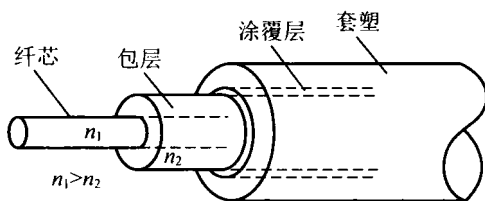


图 2.1 光纤的结构示意图

光纤的中心部分是纤芯，其折射率比包层稍高，损耗比包层更低，光能量主要在纤芯内传输；包层是为光的传输提供反射面和光隔离，将光波封闭在光纤中传播，并对纤芯起着一定的机械保护作用。光纤纤芯和包层折射率分别为  $n_1$  和  $n_2$ 。光波在光纤中是通过全反射传播的，因此只有  $n_1 > n_2$  才能达到传导光波的目的。

为了实现纤芯和包层的折射率差异，就需要纤芯和包层的材料不同，目前纤芯的主要成分是石英(二氧化硅)。在石英中掺入其他杂质，就构成了包层，如果要提高石英材料的折射率，可以掺入二氧化锗、五氧化二磷等；如果要降低石英材料的折射率，可以掺入三氧化二硼、氟等。

实际的光纤不是裸露的玻璃丝，而是在光纤的外围附加涂覆层和套塑，主要是保护光

纤, 增加光纤的强度。

## 2.1.2 光纤的类型

根据光纤的材料成分、折射率、传输模式等分类, 主要有以下几种类型。

### 1. 按光纤的材料分类

按照光纤的材料来分, 一般可分为石英系光纤、掺稀土光纤、复合光纤、氟化物光纤、塑包光纤、全塑光纤、碳涂层光纤和金属涂层光纤共 8 种。

#### 1) 石英系光纤

石英玻璃光纤是一种以高折射率的纯石英玻璃( $\text{SiO}_2$ )材料为芯, 以低折射率的有机或无机材料为包层的光学纤维。石英玻璃光纤传输波长范围宽, 数值孔径(NA)大, 光纤芯径大, 力学性能好, 很容易与光源耦合。在信息传输、传感、光谱分析、激光医疗、照明等领域的应用极为广泛。

#### 2) 掺稀土光纤

掺稀土光纤是在光纤的纤芯中, 掺杂铒(Er)、钕(Nd)、镨(Pr)等稀土族元素的光纤。1985年英国的南安普顿(Southampton)大学的佩恩(Payne)等首先发现掺杂稀土元素的光纤(Rare Earth Doped Fiber)有激光振荡和光放大的作用。目前使用的 1550nm 波段的 EDFA 就是利用掺铒的单模光纤作为激光工作物质的。

#### 3) 复合光纤

复合光纤是在石英玻璃( $\text{SiO}_2$ )原料中适当混合氧化钠( $\text{Na}_2\text{O}$ )、氧化硼( $\text{B}_2\text{O}_3$ )、氧化钾( $\text{K}_2\text{O}$ )等氧化物制成的光纤。其特点是软化点低, 纤芯与包层的折射率差别大, 把光束缚在纤芯的能力强。主要应用于医疗业务的光纤窥镜。

#### 4) 氟化物光纤

氟化物光纤(Fluoride Fiber)是由多种氟化物玻璃制成的光纤。这种光纤原料简称 ZBLAN(氟化锆( $\text{ZrF}_4$ )、氟化钡( $\text{BaF}_2$ )、氟化镧( $\text{LaF}_3$ )、氟化铝( $\text{AlF}_3$ )、氟化钠( $\text{NaF}$ )等氟化物简化的缩略语)。其工作波长在 2~10 $\mu\text{m}$  范围, 具有超低损耗的特点, 用于长距离光纤通信, 目前尚未广泛实用。

#### 5) 塑包光纤

塑包光纤(Plastic Clad Fiber)是用高纯度的石英玻璃制成纤芯, 用硅胶等塑料(折射率比石英稍低)作为包层的阶跃型光纤。它与石英光纤相比, 具有纤芯粗、数值孔径(NA)高的优点。因此, 易与发光二极管 LED 光源结合, 损耗也较小。所以, 非常适用于局域网(LAN)或者近距离通信。

#### 6) 全塑光纤

全塑光纤(Plastic Optical Fiber)是光纤的纤芯和包层都是用塑料(聚合物)制成。塑料光纤的纤芯直径为 1000 $\mu\text{m}$ , 是单模石英光纤的 100 倍, 并且接续很简单, 而且易于弯曲, 容易施工。在汽车内部或者家庭局域网中得到应用。

#### 7) 碳涂层光纤

碳涂层光纤(Carbon Coated Fiber, CCF)是在石英光纤的表面上涂敷有碳膜的光纤。其利用碳素的致密膜层, 使光纤表面与外界隔离, 以改善光纤的机械疲劳损耗和氢分子的





损耗。

### 8) 金属涂层光纤

金属涂层光纤(Metal Coated Fiber)是在光纤表面涂上 Ni、Cu、Al 等金属层的光纤。它在恶劣环境中得到广泛应用。

## 2. 按折射率分布分类

按照折射率分布来分，一般可以分为阶跃型光纤和渐变型光纤两种。

### 1) 阶跃型光纤

如果纤芯折射率(指数)沿半径方向保持一定，包层折射率沿半径方向也保持一定，而且纤芯和包层折射率在边界处呈阶梯形变化的光纤，称为阶跃型光纤，又可称为均匀光纤。这种光纤一般纤芯直径为  $50\sim 80\mu\text{m}$ ，特点是信号畸变大。它的结构如图 2.2(a)所示。

### 2) 渐变型光纤

如果纤芯折射率沿着半径加大而逐渐减小，而包层折射率是均匀的，这种光纤称为渐变型光纤，又称为非均匀光纤。这种光纤一般纤芯直径为  $50\mu\text{m}$ ，特点是信号畸变小。它的结构如图 2.2(b)所示。

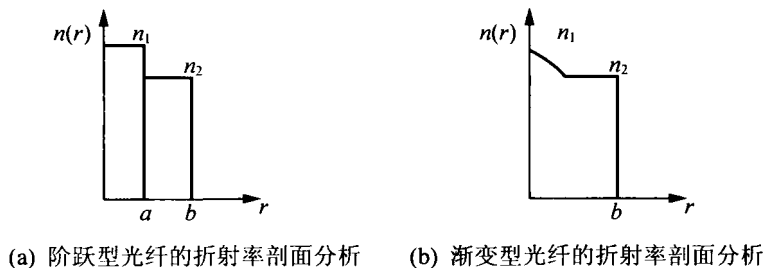


图 2.2 阶跃型和渐变型光纤折射率分布

## 3. 按传输模式的多少分类

模式实际上就是指光纤中一种电磁场场型结构分布形式。不同的模式有不同的电磁场场型。根据光纤中传输模式的数量，可分为单模光纤和多模光纤。

### 1) 单模光纤

单模光纤是指只能传输基模( $\text{HE}_{11}$ )，即只能传输一个最低模式的光纤，其他模式均被截止。单模光纤的纤芯直径较小，为  $4\sim 10\mu\text{m}$ ，通常，纤芯中折射率的分布认为是均匀分布的。由于单模光纤只传输基模，从而完全避免了模式色散，使传输带宽大大加宽。因此，它适用于大容量、长距离的光纤通信。这种光纤特点是信号畸变小。

### 2) 多模光纤

多模光纤是指可以传输多种模式的光纤，即光纤传输的是一个模群。多模光纤的纤芯直径约为  $50\mu\text{m}$ ，由于模式色散的存在会使多模光纤的带宽变窄，但其制造、耦合、连接都比单模光纤容易。