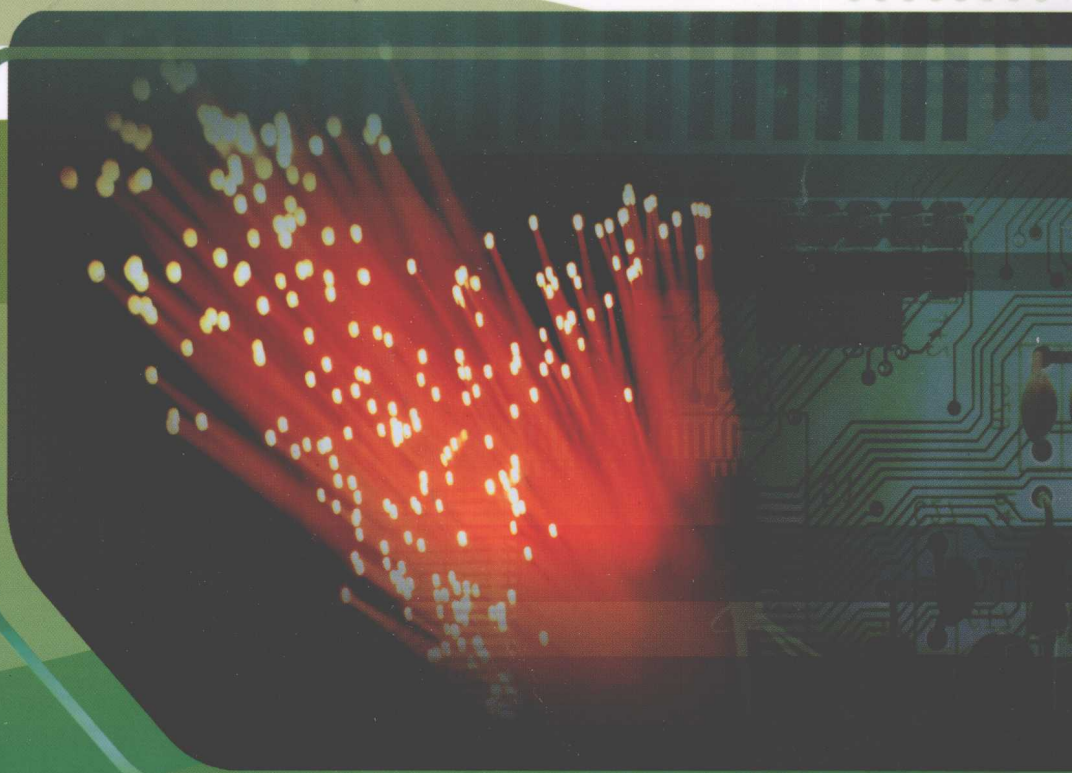




高等学校信息与通信工程“十一五”规划教材

# 光纤通信技术基础

主编 / 包建新 副主编 / 张雅彬 王 勇 主审 / 童国泰



 哈尔滨工程大学出版社  
Harbin Engineering University Press

TN929.1/12

2008

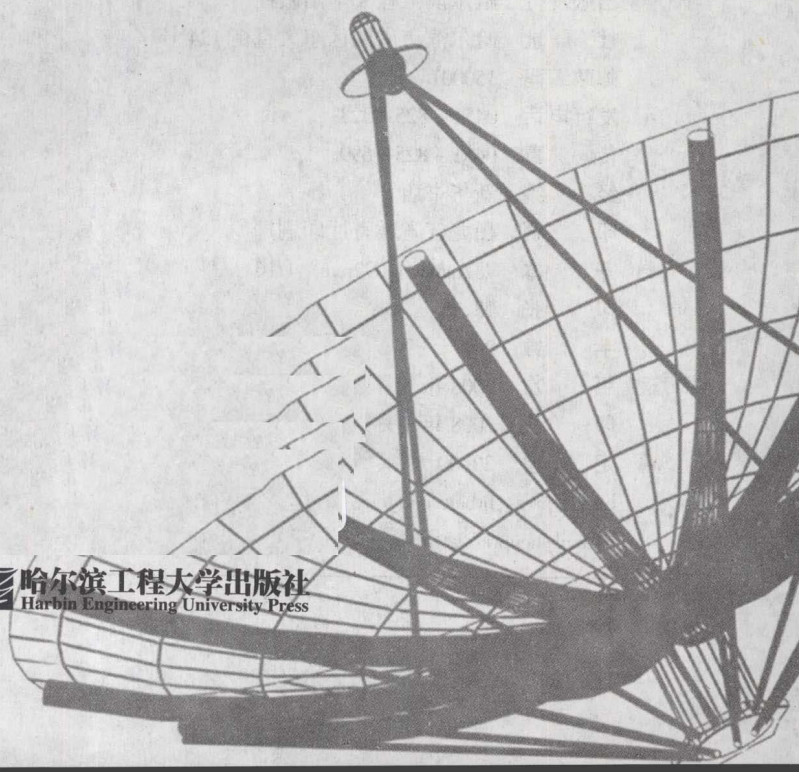


高等学校信息与通信工程“十一五”规划教材

# 光纤通信技术基础

主编/包建新 副主编/张雅彬 王勇 主审/童国泰

 哈尔滨工程大学出版社  
Harbin Engineering University Press



## 内 容 简 介

本书作为非邮电院校光纤通信类课程教材,重点讲述了目前广泛应用的数字编码、强度调制、直接强光检测工作方式的光纤通信系统的组成、工作原理、系统设计及未来的发展。并且介绍了通信用光纤及通信系统各组成部分参数指标的测量技术。

光纤作为传输介质,在信号传输方面已渗透到国民经济建设的各个领域,极大地推动了社会文明进步与发展。本书取材相对广泛,在有限的教学时数内,尽可能地将光纤通信理论与工程实际相结合,使学生建立起一个完整的光纤通信系统的概念。

本书编排中尽量简化繁杂的数学推导和深奥的物理模型,力求深入浅出,便于读者学习和阅读。

本书可作为普通高等院校本科生教材,也适合从事光纤通信工作的工程技术人员参考。

## 图书在版编目(CIP)数据

光纤通信技术基础/包建新主编. —哈尔滨:  
哈尔滨工程大学出版社,2008.3  
ISBN 978-7-81133-190-5

I.光… II.包… III.光纤通信-教材  
IV.TN929.11

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 023985 号

---

出版发行 哈尔滨工程大学出版社

社 址 哈尔滨市南岗区东大直街 124 号

邮政编码 150001

发行电话 0451-82519328

传 真 0451-82519699

经 销 新华书店

印 刷 黑龙江省教育厅印刷厂

开 本 787mm×1 092mm 1/16

印 张 13.75

字 数 280 千字

版 次 2008 年 3 月第 1 版

印 次 2008 年 3 月第 1 次印刷

定 价 20.00 元

<http://press.hrbeu.edu.cn>

E-mail: heupress@hrbeu.edu.cn

---

# 前 言

本书是一本光纤通信类课程的简明教材,涵盖了“光纤通信技术基础”及“光纤及光纤通信测量技术”二门课程的内容。

目前,光纤通信正向着大容量,高速率,长距离方向迅猛发展,其技术特点主要体现在高速化,网络化,光波长长波长化和光器件集成化方面。同时,光纤通信技术的日益普及化在国民经济建设的诸多领域,例如,在工厂、企业、机关、学校,甚至飞机上都得到广泛的应用。舰船中越来越多的传统信息传输方式迅速地被光纤通信所取代。光纤通信不仅在邮电通信,也在广播电视,计算机网络及军事工程中广泛应用。

近年来,国内非邮电类高等院校。普遍开设了光纤通信课程,我们根据多年来的教学经验和科研工作的体会,有机地将教学大纲要求的光纤通信的基本原理和实际应用的需要结合起来,编写了本教材。教材内容力求深入浅出,力求在基本概念的描述上强调工程性和实用性,避免繁琐的数学推导和过于深奥的物理理论,在有限的教学时数内,帮助读者建立一个相对完整的光纤通信系统及其各组成部分的工作原理的概念。

本书内容共分9章。第1章介绍光纤通信基本概念。第2章介绍通信用光纤结构、分类、传输理论、传输特性及光缆的构成。第3章介绍组成光纤通信系统所必需的无源光器件,第4章介绍半导体光源器件及光发送端机。第5章介绍半导体光电检测器件及光接收端机。第6章介绍光纤通信系统及设计。第7章介绍光纤及光纤通信系统的测量技术。第8章介绍光复用技术。第9章介绍光纤通信新技术。

本书由包建新主编,童国泰主审。包建新编写1、8、9章,张雅彬编写2、4、5章,王勇编写3、6、7章,最后由包建新统编全稿。

本书在编写过程中参考了国内很多兄弟院校的优秀教材和著作。从这些优秀教材和著作中获得了很多有益的启发和帮助,并吸收部分经典内容,在此谨向收录于参考文献中的各位作者和同仁表示诚挚的谢意。

本书可作为普通高等学校工科通信工程、信息工程、电子科学与技术等专业本科生教材,也可供工程技术人员参考。

由于作者水平有限,经验不足,成书时间紧迫,书中难免有错误或疏漏之处,恳请广大读者批评指正。

编 者

2008年2月

# 目 录

第1章 概述 .....	1
1.1 光纤通信发展的历史和现状 .....	1
1.2 光纤通信的基本概念 .....	2
1.3 光纤通信系统的基本组成与分类 .....	4
1.4 光纤通信的特点与应用 .....	7
1.5 光纤通信的发展趋势 .....	8
复习思考题 .....	10
第2章 光纤和光缆 .....	11
2.1 光纤的结构与类型 .....	11
2.2 光纤的射线理论分析 .....	14
2.3 阶跃光纤的波动理论分析 .....	19
2.4 光纤的损耗特性 .....	26
2.5 光纤的色散特性 .....	29
2.6 光缆 .....	37
复习思考题 .....	41
第3章 常用光无源器件 .....	43
3.1 光隔离器和光环行器 .....	43
3.2 光纤的连接 .....	46
3.3 光损耗器和光开关 .....	48
3.4 光纤耦合器 .....	52
3.5 光纤光栅 .....	54
3.6 波分复用器 .....	60
复习思考题 .....	63
第4章 光源与光发送机 .....	64
4.1 半导体光源的物理基础 .....	64
4.2 半导体激光器 .....	69
4.3 发光二极管 .....	73
4.4 光源的主要技术指标 .....	75
4.5 光发送机 .....	75
4.6 驱动电路和辅助电路 .....	78
4.7 光线路编码 .....	84
复习思考题 .....	89
第5章 光电检测器与光接收机 .....	91
5.1 光电检测器 .....	91
5.2 光接收机 .....	96

5.3	误码率 .....	109
5.4	灵敏度计算 .....	112
	复习思考题 .....	116
<b>第 6 章</b>	<b>光纤通信系统及设计 .....</b>	<b>117</b>
6.1	模拟光纤通信系统 .....	117
6.2	数字光纤通信系统 .....	122
6.3	IM-DD 数字光纤通信系统设计 .....	129
6.4	光放大器及其在光纤通信系统中的应用 .....	134
	复习思考题 .....	138
<b>第 7 章</b>	<b>光纤及光纤通信系统的测量 .....</b>	<b>140</b>
7.1	光纤几何参数的测量 .....	140
7.2	光纤光学参数的测量 .....	144
7.3	光纤损耗特性的测量 .....	150
7.4	光纤色散或带宽的测量 .....	154
7.5	单模光纤归一化频率的测量 .....	160
7.6	单模光纤拍长的测量 .....	162
7.7	光纤通信系统的测量 .....	165
7.8	光源器件和光电检测器件主要参数的测量 .....	171
	复习思考题 .....	175
<b>第 8 章</b>	<b>光复用技术 .....</b>	<b>176</b>
8.1	光复用技术的基本概念 .....	176
8.2	波分复用 WDM .....	180
	复习思考题 .....	191
<b>第 9 章</b>	<b>光纤通信新技术 .....</b>	<b>192</b>
9.1	相干光通信 .....	192
9.2	光孤子通信技术 .....	196
9.3	全光网络技术 .....	204
	复习思考题 .....	212
	参考文献 .....	213



# 第 1 章 概 述

## 1.1 光纤通信发展的历史和现状

### 1.1.1 光纤通信发展的历史

1966年,英籍华裔学者高锟博士(K.J.C. Kao)在PIEE杂志上发表了《用于光频的光纤表面波导》,该文分析了用光纤作为传输媒体以实现光通信的可能性,并设计了通信用光纤的波导结(即阶跃光纤)。他科学地预言了制造通信用的超低耗光纤的可能性,即加强原材料提纯,加入适当的掺杂剂,可以把光纤的损耗系数降低到20 dB/km以下。这篇文章被誉为光纤通信的里程碑。

1970年,美国康宁公司制造出当时世界上第一根低损耗光纤,也就是说找到了实现低损耗传输光波的理想传输媒体,是光通信研究的重大实质性突破。

1970年以后,世界各发达国家对光纤通信的研究倾注了大量的人力与物力,使光纤通信技术取得了极其惊人的进展。

从光纤的损耗看,1970年是20 dB/km,1972年是4 dB/km,1974年是1.1 dB/km,1976年是0.5 dB/km,1979年是0.2 dB/km,1990年是0.14 dB/km,已经接近石英光纤的理论损耗极限值0.1 dB/km。

从光器件看,1970年,美国贝尔实验室研制出世界上第一只在室温下连续波工作的砷化镓铝(GaAlAs)半导体激光器,为光纤通信找到了合适的光源器件。后来逐渐发展到性能更好、寿命达几万小时的异质结条形激光器和现在的分布反馈式单纵模激光器(DFB)以及多量子阱激光器(MQW)。光接收器件也从简单的硅PIN光电二极管发展到量子效率达90%的Ⅲ-V族雪崩光电二极管APD。

从光纤通信系统看,正是光纤制造技术和光电器件制造技术的飞速发展,以及大规模、超大规模集成电路技术和微处理机技术的发展,带动了光纤通信系统从小容量到大容量、从短距离到长距离、从旧体制(PDH)到新体制(SDH)的迅猛发展。

### 1.1.2 光纤通信发展的现状

1976年美国在亚特兰大进行的现场试验,标志着光纤通信从基础研究发展到了商业应用的新阶段。此后,光纤通信技术不断创新:光纤从多模发展到单模,工作波长从850 nm发展到1310 nm和1550 nm,传输速率从几十Mbit/s发展到几十Gbit/s。另一方面,随着技术的进步和大规模产业的形成,应用范围不断扩大:从初期的市话局间中继到长途干线,进一步延伸到用户接入网,从数字电话到有线电视(CATV),从单一类型信息的传输到多种业务的传输。目前光纤已成为信息宽带传输的主要媒质,光纤通信系统将成为未来国家信息基



基础设施的支柱。

1980年,美国标准化 FT-3 光纤通信系统投入商用,系统采用渐变型多模光纤,速率为 44.7 Mbit/s。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 5 104 km。1976 年和 1978 年,日本先后进行了速率为 34 Mbit/s,传输距离为 64 km 的渐变型多模光纤通信系统,以及速率为 100 Mbit/s,全长为 3 400 km,初期传输速率为 400 Mbit/s,后来扩容到 1.6 Gb/s。随后,由美、日、英、法发起的第一条横跨大西洋 TAT-8 海底光缆通信系统于 1988 年建成,全长 6 400 km;第一条横跨太平洋 TPC-3/HAW-4 海底光缆通信系统于 1989 年建成,全长 13 200 km。从此,海底光缆通信系统的建设得到了全面展开,促进了全球通信网的发展。光纤通信的发展可以粗略地分为三个阶段。

第一阶段(1970 年—1979 年):光纤与半导体激光器的研制成功,使光纤通信进入实用化。1977 年美国亚特兰大的光纤市话局间中继系统是世界上第一个光纤通信系统。

第二阶段(1979 年—1989 年):光纤技术取得进一步突破。数字系统的速率不断提高,光纤连接技术与器件寿命问题都得到解决,光传输系统与光缆线路建设逐渐进入高潮。

第三阶段(1989 年至今):光纤数字系统由 PDH 向 SDH 过渡,传输速率进一步提高。1989 年掺铒光纤放大器(EDFA)的问世给光纤通信技术带来巨大变革。EDFA 的应用不仅解决了长途光纤传输损耗的放大问题,而且为光源的外调制、波分复用器件、色散补偿元件等提供了能量补偿,这些网络元件的应用,又使得光传输系统的调制速率迅速提高,并促成了光波分复用技术的实用化。

总之,从 1970 年到现在虽然只有短短 30 多年的时间,但光纤通信技术却取得了极其惊人的进展。然而就目前的光纤通信而言,其实际应用仅是其潜在能力的 2% 左右,还有巨大的潜力等待人们去开发和利用。

## 1.2 光纤通信的基本概念

利用光导纤维传输光波信号的通信方式称为光纤通信。

光波属于电磁波的范畴,按照波长不同(或频率不同)电磁波的种类和名称如图 1-1 所示。从图中可以看出,属于光波范畴之内的电磁波包括紫外线、可见光和红外线,它们各自的波长范围如图 1-2 所示。

目前光纤通信的实用工作波长在近红外区,即  $0.8\ \mu\text{m} \sim 1.8\ \mu\text{m}$  的波长区,对应的频率为 167 THz ~ 375 THz。各种单位的换算公式如表 1-1 所示。

光导纤维(简称为光纤)本身是一种介质,目前实用通信光纤的基础材料是  $\text{SiO}_2$ ,因此它是属于介质光波导的范畴。对于  $\text{SiO}_2$  光纤,在上述波长区内的三个低损耗窗口,是目前光纤通信的实用工波长,即 850 nm、1 310 nm 及 1 550 nm。



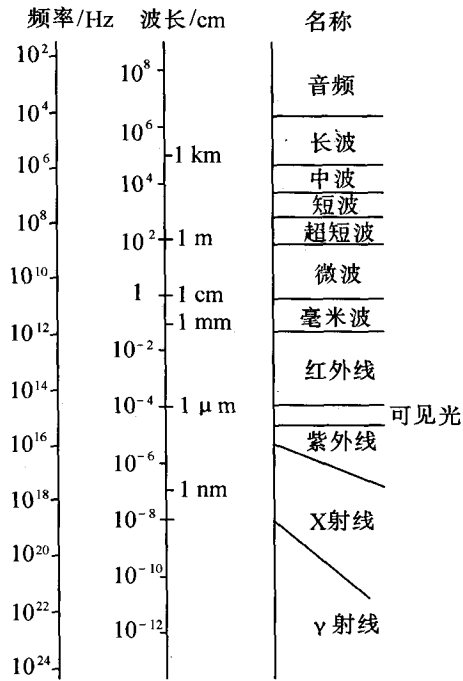


图 1-1 电磁波的种类的名称

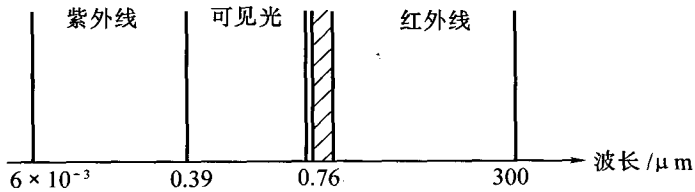


图 1-2 光波的波长范围

表 1-1 各种单位的换算

$\lambda = c/f$	1 MHz(兆赫) = $10^6$ Hz
1 $\mu$ m(微米) = $10^{-6}$ m	1 GHz(吉赫) = $10^9$ Hz
1 nm(纳米) = $10^{-9}$ m	1 THz(太赫) = $10^{12}$ Hz
1 Å(埃) = $10^{-10}$ m	1 PHz(拍赫) = $10^{15}$ Hz

## 1.3 光纤通信系统的基本组成与分类

### 1.3.1 光纤通信系统的基本组成

目前实用的光纤通信系统,采用的是数字编码、强度调制、直接检测的通信系统。该系统主要由光发射机、光纤、光接收机以及长途干线上必须设置的光中继器组成,如图 1-3 所示。

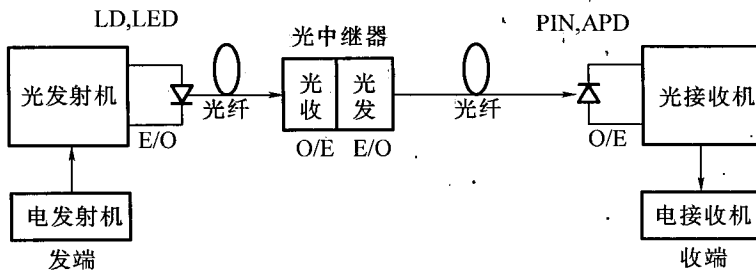


图 1-3 光纤数字通信系统示意图

在点对点的光纤通信系统中,信号的传输过程如下。

在发射端,电端机把模拟信息(如语音)进行模/数转换,转换后的数字信号复用后再去调制发射机中的光源器件,则光源器件就会发出携带信息的光波。如当数字信号为“1”时,光源器件发射一个“传号”光脉冲;当数字信号为“0”时,光源器件发射一个“空号”(不发光)。光发射机的作用就是进行电/光转换,把数字化的电脉冲信号流(如 PCM 语音信号)转换成光脉冲信号流并输入到光纤中进行传输。

光波经光纤传输后到达接收端。

在接收端,光接收机把数字信号从光波中检测出来送给电端机,而电端机解复用后再进行数/模转换,恢复成原来的模拟信息。光接收机的作用就是进行光/电转换,把数字电信号(通信信息)经过放大、均衡后再生出波形整齐的电脉冲信号。就这样完成了一次通信的全过程。

为了保证通信质量,在收发端机之间适当距离上必须设有光中继器。光纤通信中光中继器的形式主要有两种,一种是光-电-光转换形式的中继器,另一种是在光信号上直接放大的光放大器。尤其是 EDFA,其增益高、输出功率大、噪声低、带宽大、完全可代替光-电-光中继器,正推动着光纤通信技术的革命——新一代全光通信技术。

若干个点对点通信系统组合就构成通信网(图 1-4),以提供异地用户之间通信。这些网采用光纤通信技术已是大势所趋。

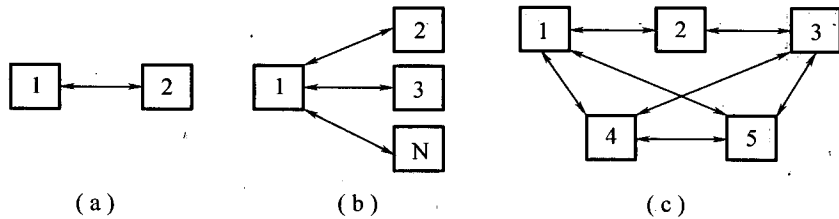


图 1-4 光纤通信系统的拓扑结构  
(a)点对点系统;(b)一点对多点系统;(c)光纤网

### 1.3.2 光纤通信系统的分类

光纤通信系统可以根据系统所使用的光波长、传输信号形式、传输光纤、信号的调制方式、光接收方式的不同和光纤中传送的是单波长通道还是多波长通道的信号,而分成各种光纤通信系统。

#### 1. 按传输信道数目划分

##### (1) 单信道(波长)系统

在一根光纤中只传送一个光波长,采用时分复用的方式(TDM)提高系统传输容量。

##### (2) 粗波分复用系统(CWDM)

在一根光纤中间同时传送少量不同光波长的光信号(信道间隔大于 20 nm)。粗波分复用系统在业务类型繁杂、传输容量多变的城域网中广泛采用。

##### (3) 密集波分复用系统(DWDM)

在一根光纤中同时传送多个不同波长的光信号(信道间隔大于 0.8 nm),同时采用时分复用提高每一个波长的传输速率,使系统容量得到数百倍的提高。

DWDM 技术将是光传输系统扩容的发展方向。高速 DWDM 系统对光纤器件的性能有特殊要求,推动了光纤、光器件及光放大技术的快速发展。

#### 2. 按传输信号的类型划分

##### (1) 模拟光纤通信系统

模拟光纤通信系统传送的是模拟信号,并用于广播节目、彩色电视节目、工业监视信号、交通监控信号等的传输。

##### (2) 数字光纤通信系统

数字光纤通信系统用于传输电的 PCM 数字信号。它的设备较复杂,但传输质量高,通信距离长,是广泛采用的系统。

#### 3. 按光调制的方式划分

##### (1) 直接强度调制 IM

采用电信号对光源进行强度调制,在接收端用光检测器直接检测,称为 IM-DD 系统。目前应用的光纤通信系统均属此类型。其优点是简单、经济,但通信容量受到限制。

##### (2) 间接调制

采用晶体的电光效应、磁光效应和声光效应等性质对光辐射进行调制,既适用于半导体



光源,也适用于其他类型的光源。间接调制最常用的是外调制,即在激光形成后加载调制信号。在高速长距离光纤系统中,采用间接调制有利于提高系统性能。在 PSK 相干光纤通信系统的发射机中,一般要用外调制。

#### 4. 按接收方式划分

##### (1) 直接检测 DD

直接检测是用检测器直接把光信号转换为电信号。这种检测方式具有设备简单、经济实用的特点,是当前光纤通信系统普遍采用的方式。

##### (2) 相干检测 CD

在发送端用电信号对光源发出的单频光载波进行调制。用单模光纤传输到接收端,收到信号后与接收机内部产生的本振光源混频,再用光检测器检出光载波和本振光之差频的中频电信号,然后再解调出电信号。这种检测方式类似于无线通信中的外差接收技术。

#### 5. 按光波长划分

##### (1) 短波长光纤通信系统

采用多模光纤,工作在 800 nm ~ 900 nm 波长范围,目前主要用于计算机局域网、用户接入网等传输速率较低、传输距离较短的系统。

##### (2) 长波长光纤通信系统

长波长光纤通信系统工作在 1 000 nm ~ 1 600 nm 波长范围。通常采用 1 310 nm 和 1 550 nm 两种波长。采用 1 310 nm 波长时,可以选用石英多模光纤,也可选用石英单模光纤。在 1 550 nm 波长上只用单模光纤,由于此波段上石英光纤有最低的损耗,因而这类系统的中继距离较长。

#### 6. 按光纤的传输特性划分

##### (1) 多模光纤通信系统

这种系统采用石英多模渐变光纤作为传输媒质。传输带宽受到限制,一般应用于 140 Mbit/s 以下的系统。目前,多模光纤系统主要应用于数据网络及某些专用网络。

##### (2) 单模光纤通信系统

采用石英单模光纤作为传输媒质。传输容量大,无中继传输距离长。目前建设的长途干线网及本地网光纤通信系统基本上都是这一类型的系统。

#### 7. 按应用的范围划分

##### (1) 公用光纤通信系统

通常把电信、广电部门应用的光纤通信系统称为公用光纤通信系统。其中又可分为光纤市话中继通信系统、光纤长途传输系统、光纤用户环路系统及有线电视系统等。

##### (2) 专用光纤通信系统

通常把各部门、各行业,如电力、铁道、公路交通、大型厂矿企业、军事等部门应用的光纤通信系统称为专用光纤通信系统。

但是目前电信运营的格局已有所变化,国家政策已允许某些具备条件的专用网络进入公用电信服务。



## 1.4 光纤通信的特点与应用

光纤通信得以广泛的应用和发展,是由其自身的特点所决定的。下面着重讨论光纤通信的特点和应用。

### 1.4.1 光纤通信的特点

光纤通信和其他通信手段相比,具有无以伦比的优越性。

(1)通信容量大。通信的容量通常用  $B$  和  $L$  的乘积表示,  $B$  为比特率,  $L$  为中继距离。

从理论上讲,一根仅有头发丝粗细的光纤可以同时传输 100 亿个话路。虽然目前远未达到如此高的传输容量,但用一根光纤同时传输 50 万个话路(40 Gbit/s)的试验已经取得成功,目前使用的光波频率比微波高  $10^3 \sim 10^4$  倍,通信容量约可增加  $10^3 \sim 10^4$  倍。容量如此巨大,而一根光缆中可以包括几十根直至上千根光纤,如果再加上波分复用技术把一根光纤当作几十根、几百根光纤使用,其通信容量之大就更加惊人了。

(2)中继距离长。由于光纤具有极低的损耗系数(目前已达 0.25 dB/km 以下)若配以适当的光发射、光接收设备以及光放大器;可使其中继距离达数百千米以上甚至数千千米。这是传统的电缆(1.5 km)、微波(50 km)等根本无法与之相比拟的。

(3)保密性能好。光波在光纤中传输时只在其芯区进行,基本上没有光“泄露”,因此其保密性能极好。

(4)适应能力强。指它不怕外界强电磁场的干扰、耐腐蚀、可挠性强(弯曲半径大于 250 mm 时其性能不受影响)等。

(5)体积小、质量轻、光纤直径只有几微米至上百微米数量级,相同容量话路光缆,要比电缆轻 90% ~ 95%(光缆的质量仅为电缆的 1/10 ~ 1/20),直径不到电缆的 1/5,故运输和铺设均比电缆方便,并利于在军用战斗机上使用。

(6)资源丰富,节约有色金属。光纤的纤芯和包层的主要原料是二氧化硅,资源丰富且价格便宜,取之不尽。而电缆所需的铜、铝矿产则是有限的,采用光纤通信后可节省大量的有色金属铜。

(7)均衡容易。在工作频带内,光纤对每一频率成分的损耗几乎是相等的,一般不需在接收端采取幅度均衡措施。

### 1.4.2 光纤通信的应用

人类社会现在已发展到了信息社会,声音、图像和数据等信息的流量非常大。以前的通信手段已经不能满足现在的要求,而光纤通信以其信息容量大、保密性好、体积小、质量轻、无再生中继距离长等优点得到广泛应用。其应用领域遍及通信、交通、工业、医疗、教育、航空航天和计算机等行业,并正在向更广更深的层次发展。光及光纤的应用正给人类的生活带来深刻的影响与变革,光纤通信是当今世界上发展最快的领域之一,也是我国与国际先进水平差距最小的一个领域。光纤通信首先应用于市内电话局之间的光纤中继线路,继而广泛地用于长途干线网上,成为宽带通信的基础。光纤通信尤其适用于国家之间大容量、远



距离的通信,包括国际间长距离海底光纤通信系统。目前,各国还在进一步研究、开发用于广大用户接入网上的光纤通信系统。对于光纤通信网我们可以把它分成三个层次:一是长途干线网,它是远距离的;二是城域网,它由一个大城市中的很多光纤用户组成;三是局域网,比如一个单位、一个大楼、一个家庭。光纤通信的应用主要体现在如下几点。

(1)光纤在公用电信网间作为传输线。由于光纤损耗低、容量大、直径小、质量轻和敷设容易,所以特别适合作市内电话中继线及长途干线线路,这是光纤的主要应用场合。

(2)局域网中的应用。这是一种把计算机和智能终端通过光纤连接起来,实现工厂、办公室、家庭自动化的局部地区数字信息网。

(3)光纤宽带综合业务数字网及光纤用户线。光纤通信的发展方向是把光纤直接通往千家万户。在我国已敷设了光纤长途干线及光纤市话中继线,目前除发展光纤局域网外,还要建设和发展光纤宽带综合业务数字网以及光纤用户线。光纤宽带综合业务数字网除开办传统的电话、高速数据通信外,还开办可视电话、可视会议电话、遥远服务以及闭路电视、高质量的立体声广播等业务。

(4)作为危险环境下的通信线。诸如发电厂、化工厂、石油库等场所,对于防强电、防辐射、防危险化工产品流散、防火灾、防爆炸是非常重要的。因为光纤不导电,没有短路迸发电火花危险,故最适合这类系统。

(5)满足不同网络层面的应用。为适应光传送网向更高速率、更大容量、更长距离方向发展,光纤通信不同层次网络对光纤要求也不尽相同。在核心网层面、城域网层面、局域网层面,光纤通信都得到了广泛的应用。

(6)应用于专网。光纤通信主要应用于电力、公路、铁路、矿山等通信专网,例如电力系统是我国专用通信网中规模较大、发展较为完善的专网。随着通信网络光纤化趋势进程的加速,我国电力专用通信网在很多地区已经基本完成了从主干线到接入网向光纤过渡的过程。目前,电力系统光纤通信承载的业务主要有语音、数据、宽带业务和 IP 等常规电信业务;电力生产专业业务有保护、安全自动装置和电力市场化所需的宽带数据等。

## 1.5 光纤通信的发展趋势

光纤通信的潜力是巨大的,目前的光纤通信应用水平仅仅是其能力的 1% ~ 2% 左右。光纤通信作为现代通信的主要支柱之一,在现代通信网中起着重要的作用。光纤通信具有以下几个发展趋势:

### 1. 波分复用技术(WDM)

所谓波分复用,就是用一根光纤同时传输几种不同波长的光波,以达到扩大通信容量的目的。在系统的发送端,由各个分系统分别发出不同波长的光波,如  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4$ , 并由合波器合成一束光波进入光纤进行传输,而在接收端用分波器把几种光波分离开,分别输入到各个分系统的光接收机。

### 2. 相干光通信

迄今为止,已应用的光纤通信都是采用强度调制——直接检波的工作方式,它只相当于原始的无线通信所使用的调制与解调技术。



所谓相干光通信,就是在发送端由激光器发出谱线极窄、频率稳定、相位恒定的相干光,并用先进的调制方法(如 FSK, ASK 和 PSK)对之进行调制。在接收端,把由光纤传输来的相干光载波与本振光源发出的相干光,经光耦合器后加到光混频器上进行混频与差频,然后把差频后的中频光信号进行放大、检波。

相干光通信技术一则可以增大光纤的传输容量,二则可以大大提高光接收机的灵敏度(可提高 10 dB ~ 20 dB),其关键技术是光源器件、光波的匹配。

由发送端的光源和接收端的本振光源所发出的光,必须谱线十分狭窄(接近单频)、频率十分稳定、相位也非常恒定,否则无法进行混频与差频。此外,本振光和从光纤传输来的光载波必须具有良好的匹配,这就要求光纤应该是偏振保持光纤。

### 3. 超长波长光纤通信

为了实现越来越大的信息容量和超长距离传输,必须使用低损耗和低色散的单模光纤。目前石英光纤的损耗已接近理论极限值,再无多大潜力可挖。

研究发现,氟化物光纤在波长  $3.4 \mu\text{m}$  处的损耗理论极限,可低至  $10^{-3}$  dB/km;而金属卤化物光纤的损耗理论极限可低至  $(10^{-2} \sim 10^{-5})$  dB/km,若真的实现光纤损耗小于  $10^{-3}$  dB/km,中继距离可达 3 万多 km,那么实现全球无中继的光纤通信就会成为现实。

### 4. 光集成技术

它和电子技术中的集成电路相类似,是把许多微型光学元件,如光源器件、光检测器件、光透镜、光滤波器、光栅等集成在一块很小的芯片上,构成具有复杂性能的光器件;还可以和集成电路等电子元件集成在一起形成功能更复杂的光电部件,如光发送机与光接收机等。采用光集成技术,不仅使设备的体积、质量大大减少,而且提高了稳定性与可靠性。

### 5. 光孤子通信

通信容量越大,要求光脉冲越窄,如 2.5 Gbit/s 系统的光脉冲宽度约为 400 ps。窄光脉冲经光纤传输后,因光纤的色散作用出现脉冲展宽现象而引起码间干扰,因此脉冲展宽一直是制约大容量、长距离传输的关键因素。

经研究发现,当注入光强度足够大时,会引起光脉冲变窄的奇特现象,其光脉冲宽度可低达几个 ps,即所谓光孤子脉冲。因此用孤子脉冲可以实现超大容量的光纤通信。

### 6. 实现超大容量通信的近期趋势

社会的不断进步和发展对通信提出了越来越高的需求,光纤通信的容量在不断地扩大,而技术难题也在不断地出现。

#### (1) 时分复用(TDM)

TDM 方式是提高光纤容量的有效手段。据测算,速率每提高一个等级,TDM 的每比特的成本会下降 30% ~ 40%。但码速率越高,光纤色散的影响也越严重,因此必须采用色散补偿技术。目前,国际上 TDM 实验室水平已达到 40 Gbit/s。

#### (2) 波分复用(WDM)

WDM 方式因配置灵活、扩容方便,又可以节省光纤,所以其发展前景看好。但是国际上在以 2.5 Gbit/s 还是以 10 Gbit/s 作为 WDM 的基群的问题上出了分歧。此外,由于 G.653 光纤在开放 WDM 应用时会出现四波混频效应(FWM),所以最适合于 WDM 方式的光纤是 G.655 光纤。目前国际上 WDM 最高实验室水平为 2 640 Gbit/s。



### (3)光时分复用(OTDM)

OTDM方式和传统的TDM的区别是:光/电和电/光转换在系统中的位置不同。

现在采用的TDM方式,是把光/电和电/光转换放在高速率信道上。如先对线路信号进行光/电转换,然后对电信号进行解复用。而OTDM则是直接对高速率光信号进行复用和解复用,然后再对分支光路信号进行光/电和电/光转换。目前,OTDM最高实验室水平为200 Gbit/s。

### (4)光放大技术

对光信号直接进行放大,一直是人们追求的目标。光纤放大器,尤其是掺铒光纤放大器(EDFA)已经成熟并商品化,其工作波长为1 550 nm。它具有高增益(最高50 dB)、高速率(10Gbit/s)、低噪声和失真小等优点。此外,还有NDF(掺铈)和PDF(掺镨),其工作波长为1 310 nm,但性能不如半导体激光放大器(SOA)。SOA的工作波长为1 310 nm,它具有体积小、易驱动、高增益(20 dB)等优点,发展前景十分乐观。

### (5)全光通信网络

由于光放大与光中继、色散补偿和抑制光纤非线性效应、光交换、光复用、全光纤器件和光互连与光处理等技术的发展,全光通信网络成为必然的发展趋势。

作为电信网的光纤接入网是当前研究的重要课题,光纤接入网直接面向用户,通过光纤到路边(FTTC)、光纤到大楼(FTTB)、光纤到家庭(FTTH)等手段,为用户提供各种业务。

以上技术的实现必将带动光纤通信系统水平的提高。

## 小 结

本章简单介绍了光纤通信技术的产生背景、发展、应用等情况。

重点介绍了光纤通信的概念、光纤通信系统的组成、光纤通信系统的分类、光纤通信的优缺点和光纤通信的应用,通过本章的学习为后续课程打好基础。

## 复习思考题

- 1.什么是光纤通信?简述光纤通信系统基本组成中各部分的主要作用。
- 2.光纤通信的三个传输窗口是什么?
- 3.光纤通信系统分为哪几类?
- 4.简述光纤通信的优点。
- 5.光纤通信向哪些方面发展?



## 第2章 光纤和光缆

光纤作为光纤通信系统的物理传输媒介,其传输却很复杂。众所周知,光具有波粒二象性,光既可以看成电磁波,又可以看成由粒子组成的粒子流。因此,分析光纤中光的传输也有两种理论:射线光学(即几何光学)理论和波动光学理论。

本章首先介绍光纤的结构与类型,然后用射线光学理论和波动光学理论重点分析光在阶跃型光纤中的传输情况,再介绍光纤的损耗特性,和色散特性最后简要介绍光缆的典型结构与型号。

### 2.1 光纤的结构与类型

#### 2.1.1 光纤的结构

光纤的结构是多层同轴圆柱体,如图2-1所示,自内向外为纤芯、包层及涂覆层。通信光纤的纤芯通常是折射率为 $n_1$ 的高纯 $\text{SiO}_2$ ,并有少量掺杂剂(如 $\text{Ge}_2\text{O}$ 等),以提高折射率。包层折射率为 $n_2 (< n_1)$ ,通常也由高纯 $\text{SiO}_2$ 制造,掺杂 $\text{B}_2\text{O}_3$ 及F等以降低折射率。纤芯和包层构成裸光纤,光纤的光学特性及传输特性主要由它决定。对于通信石英光纤,多模光纤的芯径 $2a$ 大多为 $50\ \mu\text{m}$ ,单模光纤芯径仅 $4\ \mu\text{m} \sim 10\ \mu\text{m}$ 。它们的包层外径 $2b$ 一般为 $125\ \mu\text{m}$ 。在包层外面是 $5\ \mu\text{m} \sim 40\ \mu\text{m}$ 的涂覆层,材料是环氧树脂或硅橡胶,其作用是增强光纤的机械强度。再外面还有缓冲层( $100\ \mu\text{m}$ 厚)及套塑层。套塑后的光纤(称为芯线)还不能在工程中使用,必须成缆。

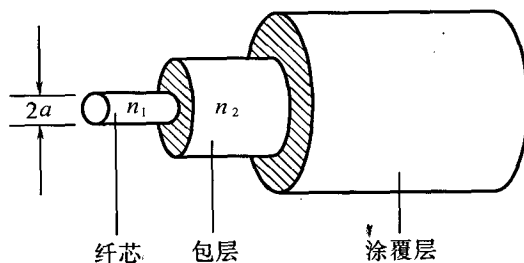


图2-1 光纤结构示意图

#### 2.1.2 光纤的类型

光纤的分类方法很多,既可以按照光纤截面折射率分布来分类,又可以按照光纤中传输模式数的多少、光纤使用的材料或传输的工作波长来分类。根据不同的分类方法,同一根光纤将会有不同的名称。

##### 1. 按光纤截面上折射率分布分类

按照截面上折射率分布的不同可以将光纤分为阶跃型光纤(Step-Index Fiber, SIF)和渐变型光纤(Graded-Index Fiber, GIF),它们的折射率分布如图2-2所示。

阶跃型光纤中纤芯的折射率为常数,在纤芯与包层的分界面处折射率阶跃降至包层折射