

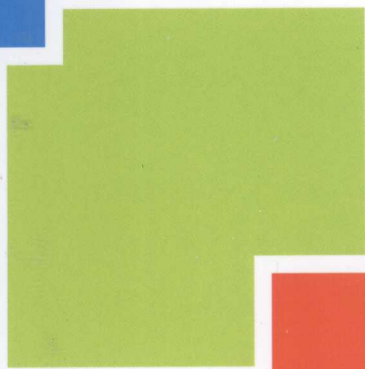
21世纪高等院校信息与通信工程规划教材
21st Century University Planned Textbooks of Information and Communication Engineering

光纤通信技术

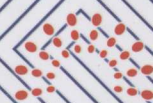
张新社 刘原华 何华 金蓉 编著

Optical Fiber

Communication Technology



人民邮电出版社
POSTS & TELECOM PRESS



高校系列

图书在版编目(CIP)数据

光纤通信技术 / 张新社等编著. — 北京: 人民邮电出版社, 2014. 1
21世纪高等院校信息与通信工程规划教材
ISBN 978-7-115-33112-0

I. ①光… II. ①张… 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242424号

内 容 提 要

本书旨在全面系统讲解光纤通信技术的基本原理、光纤通信系统和网络、相关光纤通信新理论和新技术等。主要内容包括光纤传输原理与特性、光源与光发射系统、光探测器与光接收系统、光放大器原理与应用、光纤通信系统、光接入网、光纤通信调制技术及波分复用光纤通信技术、相关光纤通信新技术等。

本书将传统光纤通信理论和光纤通信新技术进行了有机结合,内容组织系统、连贯、准确、实用,讲述深入浅出,并配备丰富的应用举例。

本书既可以作为高等院校通信与信息类专业光纤通信相关课程的教材,也可以作为从事信息和通信相关专业的技术人员学习、培训和技术参考资料。

-
- ◆ 编 著 张新社 刘原华 何 华 金 蓉
责任编辑 李海涛
责任印制 彭志环 杨林杰
 - ◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市丰台区成寿寺路11号
邮编 100164 电子邮件 315@ptpress.com.cn
网址 <http://www.ptpress.com.cn>
北京昌平百善印刷厂印刷
 - ◆ 开本: 787×1092 1/16
印张: 18.25 2014年1月第1版
字数: 446千字 2014年1月北京第1次印刷
-

定价: 42.00元

读者服务热线: (010)81055256 印装质量热线: (010)81055316
反盗版热线: (010)81055315

前 言

“光纤通信技术”是高等院校通信与信息类相关专业学生的一门专业基础必修课。根据新的教学要求，新的光纤通信技术课程教学应在加强基础理论和基本原理教学的基础上，加强学生的实际应用能力的培养和对光纤通信新知识和新技术的掌握。

本书的编写紧扣新修订的“光纤通信技术”教学大纲，结合课程组成员多年光纤通信课程教学的体会和早期对该课程的开发经验，充分学习和借鉴国内外相关光纤通信的教材和资料，力求新编教材具有如下特色：（1）教材紧密结合通信工程专业新教改要求，重视教材组织的系统性、逻辑性、准确性和实用性，并结合编写组老师的教学和课程开发经验，力图所编写的教材在保证光通信技术知识结构完整性的同时，更适合教师教学和学生学习；（2）教材在内容编写中，不仅注重光通信基本原理和理论的教学，还引入了相关光纤通信技术发展的最新理论、技术和网络系统知识，并加入相关应用举例，从而可使学生通过对本书的学习，全面掌握光纤通信技术的基础、最新技术和相关应用技能；（3）教材不仅在知识点上兼顾光通信技术的传统理论和现代发展，还希望在知识点的引入和讲解上引入新的方法，例如深入浅出的教学方法，用新媒体、图形图解法及应用等对繁复数学推导及物理现象的解释等，加深学生对知识的理解和学习。

本书主要内容包括光纤传输原理与特性、光源与光发射系统、光探测器与光接收系统、光放大器原理与应用、光纤通信系统与网络等，并对高速大容量光纤通信技术、光纤通信系统中所用到的复用技术、相关光纤通信新技术等也做了较为详尽的介绍。

本书的计划教学时数为48~64学时，各章的内容和参考教学课时分配见以下表格，教师在使用本书时也可根据各校教学要求和学生特点加以取舍。

章	课 程 内 容	课 时 分 配
第1章	绪论	3
第2章	光纤光缆技术	8
第3章	光源与光发射系统	8
第4章	光探测器与光接收系统	8
第5章	光纤通信中的光无源器件	7
第6章	光纤通信中的光放大器	4
第7章	光纤通信系统	8

续表

章	课 程 内 容	课 时 分 配
第 8 章	高速光纤通信技术	4
第 9 章	光纤通信复用技术	6
第 10 章	光纤接入网技术	4
第 11 章	光纤通信新技术	4
课 时 总 计		64

本教材由张新社任主编，并编写了第 1 章、第 2 章、第 7 章，刘原华编写了第 3 章、第 8 章、第 9 章，何华编写了第 4 章、第 5 章、第 6 章，金蓉编写了第 10 章、第 11 章。在本书编写过程中，编者参考了大量国内外光纤通信方面的相关科技书籍、科研成果及资料，编者已在参考文献中一一列出，在此对编者表示非常诚挚的感谢。

本书的编写得到西安邮电大学教材编写基金的资助，并得到校院领导和同事的鼓励和帮助，人民邮电出版社的相关编辑也提供了有益的指导和帮助，在此一并表示衷心的感谢。

由于编者水平有限，书中难免存在错误和不妥之处，恳切希望广大读者批评指正。

编 者

2013 年 5 月

目 录

第1章 绪论	1	3.1.3 激光器的一般工作原理	60
1.1 光纤通信概述	1	3.2 半导体激光器	63
1.1.1 光纤通信的基本概念	1	3.2.1 半导体激光器工作原理	63
1.1.2 光纤的发现	1	3.2.2 F-P腔半导体激光器结构 和分类	66
1.1.3 光纤通信发展历程	2	3.2.3 半导体激光器特性	68
1.2 光纤通信系统的主要特点	4	3.3 半导体发光二极管	70
1.3 光纤通信系统简介	6	3.3.1 半导体发光二极管工作原理	70
1.4 光纤通信系统的分类	8	3.3.2 半导体发光二极管结构和 分类	71
1.5 光纤通信系统的应用	9	3.3.3 半导体发光二极管特性	72
1.6 光纤通信技术发展现状及展望	9	3.4 新型半导体激光器	73
思考和练习题	15	3.4.1 分布反馈式激光器	73
第2章 光纤光缆技术	17	3.4.2 耦合腔半导体激光器	75
2.1 光纤的基本概念	17	3.4.3 量子阱激光器 (MQW)	75
2.1.1 光纤的结构	17	3.5 光源的调制	76
2.1.2 光纤的分类	19	3.5.1 光源的直接调制	77
2.2 光在光纤中的传输原理	20	3.5.2 光源的间接调制	84
2.2.1 平面波在两种介质交界面的 反射与折射	20	3.6 光发射机	86
2.2.2 光纤的射线理论分析	23	3.6.1 对光发射机的要求	86
2.2.3 光纤传输的波动理论	27	3.6.2 光发射机的组成	87
2.3 光纤传输特性	38	思考和练习题	92
2.3.1 光纤的损耗特性	38	第4章 光探测器与光接收系统	93
2.3.2 光纤的色散特性	39	4.1 光探测器	93
2.3.3 光纤的其他特性	44	4.1.1 半导体PN结的光电效应	93
2.3.4 光纤的国际标准	47	4.1.2 PIN光电二极管	95
2.4 光缆	49	4.1.3 雪崩光电二极管 (APD)	97
2.4.1 光缆结构	49	4.2 光接收机	99
2.4.2 光缆分类	51	4.2.1 光接收机的组成	99
2.4.3 光缆型号和命名	51	4.2.2 光接收机的噪声	102
思考和练习题	54	4.2.3 光接收机的主要性能指标	106
第3章 光源与光发射系统	56	思考和练习题	110
3.1 半导体材料中的光电效应	56	第5章 光纤通信中的光无源器件	112
3.1.1 能级与能带	56	5.1 光纤连接器	112
3.1.2 光与物质的三种作用	58		

5.1.1 光纤连接器的组成	113	6.4 光纤拉曼放大器 (FRA)	149
5.1.2 光纤连接器的性能	114	6.4.1 FRA 的工作原理	150
5.1.3 常用的光纤连接器	115	6.4.2 FRA 的结构和特点	151
5.2 光纤耦合器	116	6.5 光放大器的应用	153
5.2.1 光纤耦合器的类型	116	6.5.1 掺铒光纤放大器 EDFA 的	
5.2.2 光纤耦合器的结构	117	应用	153
5.2.3 光纤耦合器的特性参数	119	6.5.2 拉曼放大器的应用	153
5.3 光调制器	121	思考和练习题	155
5.3.1 电光效应	121	第 7 章 光纤通信系统	156
5.3.2 MZ 干涉型光调制器	123	7.1 光纤通信系统的概念	156
5.4 光开关	124	7.1.1 光纤通信系统的组成	156
5.4.1 光开关的分类	124	7.1.2 光纤通信系统的分类	157
5.4.2 光开关的特性参数	126	7.2 数字光纤通信系统	157
5.5 光纤光栅	127	7.2.1 数字光纤通信系统的特点	157
5.5.1 光纤光栅的分类	128	7.2.2 数字光纤通信系统的线路	
5.5.2 布拉格光纤光栅	129	码型	158
5.6 光衰减器	131	7.2.3 数字光纤通信系统特性	
5.6.1 光衰减器的分类与工作原理	131	指标与设计	160
5.6.2 光衰减器的特性参数	132	7.2.4 数字光纤通信系统的应用	170
5.7 光隔离器	133	7.3 模拟光纤通信系统	178
5.7.1 偏振相关型光隔离器	133	7.3.1 模拟光纤通信系统的概念	178
5.7.2 偏振无关型光隔离器	134	7.3.2 直接光强调制传输系统	178
5.8 光环行器	135	7.3.3 副载波光传输系统	181
5.8.1 光环行器的结构	135	7.3.4 模拟光纤通信系统的应用	183
5.8.2 光环行器的特性参数	135	思考和练习题	184
思考和练习题	136	第 8 章 高速光纤通信技术	186
第 6 章 光纤通信中的光放大器	137	8.1 高速光纤通信系统的概念	186
6.1 光放大器	137	8.2 高速光纤通信系统面临的挑战	188
6.1.1 光放大器的概念	137	8.3 高速光纤通信系统的关键技术	192
6.1.2 光放大器的分类	138	8.3.1 高速光纤技术	192
6.1.3 光放大器的主要指标	139	8.3.2 高速光器件技术	196
6.2 半导体激光放大器 (SOA)	141	8.3.3 前向纠错编码 (FEC) 技术	200
6.2.1 SOA 的工作原理	141	8.4 高速光纤通信系统的应用举例	202
6.2.2 SOA 的特性	142	思考和练习题	204
6.3 掺铒光纤放大器 (EDFA)	144	第 9 章 光纤通信复用技术	205
6.3.1 EDFA 的工作原理	144	9.1 光纤通信复用技术的概念	205
6.3.2 EDFA 的结构	146	9.1.1 光时分复用 (OTDM) 技术	205
6.3.3 EDFA 的主要指标	147	9.1.2 光码分复用 (OCDM) 技术	208
6.3.4 EDFA 的特点	149	9.1.3 光波分复用 (WDM) 技术	210

9.1.4 光频分复用 (OFDM) 技术	211	10.3 GPON 光纤接入网	250
9.1.5 光空分复用 (OSDM) 技术	211	10.3.1 GPON 光纤接入网的原理	251
9.1.6 光副载波复用 (OSCM) 技术	212	10.3.2 GPON 光纤接入网的关键技术	253
9.2 光波分复用技术	212	10.4 光纤接入网的应用举例	256
9.2.1 光波分复用原理	213	思考和练习题	258
9.2.2 光波分复用技术的主要特点	213	第 11 章 光纤通信新技术	259
9.2.3 WDM 系统的分类	214	11.1 新型光纤技术	259
9.3 密集光波分复用 (DWDM) 系统	215	11.1.1 光纤的非线性效应	259
9.3.1 DWDM 系统构成	215	11.1.2 光的双折射和偏振	263
9.3.2 DWDM 系统的关键技术	218	11.1.3 光纤孤子	264
9.3.3 DWDM 复用器	222	11.1.4 光孤子通信	266
9.3.4 光波长转换器 (OTU)	230	11.2 全光光纤通信技术	270
9.4 光波分复用系统的应用举例	231	11.2.1 全光光纤通信技术的概念、网络结构和特点	270
思考和练习题	234	11.2.2 全光光纤通信的关键技术	272
第 10 章 光纤接入网技术	235	11.3 相干光通信	278
10.1 光纤接入网技术的概念	235	11.3.1 相干光通信的基本原理	278
10.1.1 接入网的基本概念	235	11.3.2 相干光通信系统的组成	279
10.1.2 光纤接入网的概念	238	11.3.3 相干光通信的优点	280
10.1.3 光纤接入网技术的分类	242	11.3.4 相干光通信的关键技术	281
10.2 EPON 光纤接入网	243	思考和练习题	282
10.2.1 EPON 光纤接入网的原理	243	参考文献	283
10.2.2 EPON 光纤接入网的关键技术	246		

第 1 章 绪论

光纤是 20 世纪最重要的发明之一，它彻底改变了人类通信的模式，为目前的信息高速公路奠定了基础。本章主要介绍光纤通信系统的基本概念、主要技术、发展历程及未来发展的展望等，以期给读者一个关于光纤通信系统的概况描述。

1.1 光纤通信概述

1.1.1 光纤通信的基本概念

光纤通信是指利用相干性和方向性极好的激光作为载波（也称光载波）来携带信息，并利用光导纤维（光纤）进行传输的通信方式。光纤通信常用的波长范围为近红外区，如图 1.1 所示，即 $0.85 \sim 1.6 \mu\text{m}$ ，其频率范围约为 10^{14}Hz 数量级，比常用的微波频率高 $10^4 \sim 10^5$ 倍，所以其通信容量也比常用的微波通信原则上高 $10^4 \sim 10^5$ 倍。

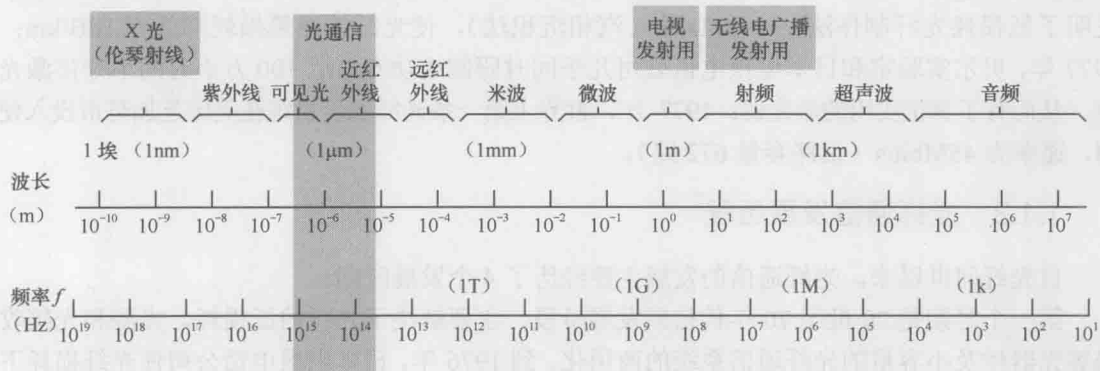


图 1.1 光纤通信常用波长范围

1.1.2 光纤的发现

早在 1951 年，研究人员就设计出了第一根光导纤维镜（fiberscope），它可用于传输人体内部器官的图像。1953 年，在伦敦皇家科学技术院工作的 Narinder Kapany，开发出了包层纤维。但当时光导纤维衰减太大（每千米达 1 000dB），无法应用于光通信领域。

在理论上解决这个难题,使得光纤通信成为现实的是英籍华裔科学家高锟(Charles Kuen Kao)。高锟于1966年7月和他的同事霍克哈姆(G.A.Hockham)发表了《用于光频的光纤表面波导》的著名论文,该文分析了用光纤作为传输介质以实现光通信的可能性,认为可以用石英基玻璃纤维进行长距离传输,并设计了通信用光纤的波导结构(即阶跃光纤)。他预言了制造通信用的超低损耗光纤的可能性,即加强原材料提纯,加入适当的掺杂剂,就可以把光纤的损耗系数降低到20dB/km以下,这篇文章被誉为光纤通信的里程碑。高锟提出的光纤,是用高纯度的玻璃纤维制成的,光进入到其中,就像进入了一个周围全是镜子的管线,在全反射的作用下,只能从另一端出来。沿着高锟指出的技术途径,1970年,美国康宁玻璃公司的三名科研人员马瑞尔、卡普隆、凯克成功地制成了每千米传输衰减只有20dB的光纤——世界上第一根低损耗的石英光纤。在当时,制成损耗如此之低的光纤可以说是惊人之举,这标志着光纤应用于光通信领域最后的障碍已经消除。

高锟的发明为光纤通信网技术在全球的迅猛发展铺平了道路,他因此获得了巨大的世界性声誉,被冠以“光纤之父”的称号,并最终获得了2009年度的诺贝尔物理学奖。关于他的贡献,瑞典皇家科学院在获奖公告中指出,他在“有关光在纤维中的传输以用于光学通信方面”取得了突破性成就。高锟的发明改变了世界通信模式,由于他创造性地把光与玻璃结合后,使影像传送、电话和计算机有了极大的发展,为信息高速公路铺下了奠基石。非常难能可贵的是高锟在巨大的荣誉面前,表现得非常谦和,他把自己的成功归功于自己的运气,总是不遗余力地为光纤通信事业竭尽全力。高锟还开发了实现光纤通信所需的辅助性子系统,他在单模光纤的构造、光纤的强度和耐久性、光纤连接器和耦合器以及扩散均衡特性等多个领域都做了大量的研究工作。高锟于1996年当选为中国科学院外籍院士,曾任香港中文大学校长。1996年,中国科学院紫金山天文台将一颗于1981年12月3日发现的国际编号为“3463”的小行星命名为“高锟星”。

激光器和低损耗光纤是光纤通信发展的关键技术,随着这两项关键技术的重大突破,使光通信从理想变为现实。其中这些关键技术比较重要的进展包括:1974年,美国贝尔实验室发明了低损耗光纤制作法——CVD法(汽相沉积法),使光纤的能量损耗降低到1dB/km;1977年,贝尔实验室和日本电报电话公司几乎同时研制成功寿命达100万小时的半导体激光器,从而有了真正实用的激光器;1977年,世界上第一条光纤通信系统在美国芝加哥市投入使用,速率为45Mbit/s(话路容量672路)。

1.1.3 光纤通信发展历程

自光纤问世以来,光纤通信的发展主要经历了4个发展时期。

第一个时期是20世纪70年代初期发展阶段,主要解决了光纤的低损耗、光源和光接收器等光器件及小容量的光纤通信系统的商用化。到1976年,日本电报电话公司使光纤损耗下降到0.5dB/km。1979年,日本电报电话公司研制出损耗0.2dB/km的光纤。目前,通信光纤最低损耗为0.17dB/km。

第二个时期是20世纪80年代的准同步数字系列(PDH)设备的突破和商用化。这个时期光纤开始代替电缆,数字传输制取代模拟传输制。由于PDH系统是点对点系统,没有国际统一的光接口规范、上下电路不方便、成本高、帧结构中没有足够的管理比特,无法进行网络的运行、管理与维护等缺点,中期出现了同步数字系列(SDH)。

第三个时期是20世纪90年代的通信标准的建立和同步数字系列(SDH)设备的研制成

功及其大量商用化。

1984年初,美国贝尔通信研究所首先开始了同步信号光传输体系的研究。1985年美国国家标准协会(ANSI)根据贝尔通信研究所提出的建立全同步网的构想,决定起草光同步网标准,并命名为同步光网络(Synchronous Optical Network, SONET)。SONET的最初目标是要使各个供应商生产的设备有统一的标准光接口,使网络在光路上能够互通。后来的发展大大超出这个目标,形成了全新的传输体系,从而引出了传送网的概念。它已不再是只针对某种数字光通信设备或系统的规范,而是一个全网的概念。

1986年国际电报电话咨询委员会(CCITT)开始审议SONET标准,随后建议增加2Mbit/s和34Mbit/s支路接口,随后在设备功能、光接口、组网方式和网络管理等方面逐步地予以规范,到目前为止已形成了一个完整的全球统一的光纤数字通信标准。SDH真正实现了网络化的运行、管理与维护,由于实现大容量传输、传输性能好,在干线上光纤开始全面取代电缆,SDH中光只是用来实现大容量传输,所有的交换、选路和其他智能都是在电层面上实现的;SDH技术偏重于业务的电层处理,具有灵活的调度、管理和保护能力,OAM功能完善。但是,它以VC4为基本交叉调度颗粒,采用单通道线路,容量增长和调度颗粒大小受到限制,无法满足业务的快速增长。

第四个时期是21世纪以来,波分复用(WDM)通信系统设备的突破和大量商用化。随着现代电信网对传输容量要求的急剧提高,利用电时分复用方式已日益接近硅和镓砷技术的极限:当系统的传输速率超过10Gbit/s时,由于受到电子迁移速率的限制,即所谓的“电子瓶颈”问题,电时分复用方式实现起来非常困难,并且传输设备的价格也很高,光纤色度色散和极化模色散的影响也日益加重。因此,如何充分利用光纤的频带资源,提高系统的通信容量,从而降低每一通路的成本,成了光纤通信理论和设计上的重要问题。

光波分复用是多个信源的电信号调制各自的光载波,经复用后在一根光纤上传输,使一根光纤起到多根光纤的作用,通信容量成数十倍、百倍地提高。采用WDM技术可以大幅度扩大通信容量,降低每话路成本。有人说WDM是通信史上的一大革命。也有人把它提高到与摩尔定律一样的高度。不过WDM给人类带来的好处显而易见:新技术将不同的颜色(波长)组合到同一光纤上,再分出很多颜色。这样,要增加通信线路的话,只要在采用WDM技术的光缆上加一点颜色就可以了,而无须挖地开路。

WDM技术作为一种系统概念,可以追溯到1970年初,在当时仅用两个波长,在1300nm窗口波长和1500nm窗口波长,利用WDM技术实现单纤全双工传输。初期的WDM网络主要致力于点对点系统的研究,作为WDM技术发展的重要阶段,1987年Bellcore在LAMB-DANET规划中开发出有18个波长波道的WDM系统。具有开拓性进展的是1978年K.O.Hill等人首次发现掺铈光纤中的光感应光栅效应,在此基础上Meltz等人于1989年终于研究发明出紫外光侧面写入光折度光栅技术,从而使采用光纤光栅实现WDM复用技术获得突破性进展,其复用波道数增加到100个以上。1995年,Lucent的8×2.5Gbit/s密集波分复用系统正式投入商用。到1999年中期WDM实用化系统已经实现96个波道。北电公司宣布于2000年起开发有160个波长波道数的WDM系统,每个波道传输10Gbit/s,其一根光纤传输信息总容量为1.6Tbit/s。目前,我国已建成“八纵八横”干线网,连通全国各省区市。光纤通信已成为我国通信的主要手段。从1999年我国生产的8×2.5Gbit/s WDM系统首次在青岛至大连开通,随之沈阳至大连的32×2.5Gbit/s WDM光纤通信系统开通,再到2005年

3.2Tbit/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。由于 WDM 系统技术的经济性与有效性，使之成为当前光纤通信网络扩容的主要手段。

近年来，IP 业务的增长势如破竹、如火如荼，已成为世界瞩目的焦点和推动全球信息业发展的主要力量，并给整个网络的技术模式、整体架构及业务节点的实现方式、组网形态、业务能力等诸多方面带来了深远的影响。WDM 技术的成熟使得以较低成本提供巨大的网络容量成为现实，在此基础上形成了 WDM 光层。人们发现 WDM 技术在提高传输能力的同时，还具有无可比拟的联网优势。普通的点到点波分复用通信系统尽管有巨大的传输容量，但只提供了原始的传输带宽，需要有灵活的节点才能实现高效的灵活组网能力，全光节点可以彻底消除光/电/光设备产生的带宽瓶颈，保证网络容量的持续扩展性；省去昂贵的光电转换设备，大幅度降低建网和运营维护成本；可以实现网络对客户层信号的透明性，支持不同格式或协议的信号；可以避免光电转换环节及复杂的时隙指配过程，加快高速电路的指配和业务供给速度；可以实现在波长级灵活组网的目的；可以实现快速网络恢复，改进网络的生存性和质量。光传送网是继 PDH、SDH 之后的新一代数字光传送技术体制，它能解决传统 WDM 网络无波长/子波长业务调度能力、组网能力弱、保护能力弱等问题。光传送网以多波长传送、大颗粒调度为基础，综合了 SDH 及 WDM 的优点，可在光层及电层实现波长及子波长业务的交叉调度，并实现业务的接入、封装、映射、复用、级联、保护/恢复、管理及维护，形成一个以大颗粒宽带业务传送为特征的大容量传送网络。

随着网络业务向动态的 IP 业务的继续汇聚，一个灵活、动态的光网络是不可或缺的，最新发展趋势是自动交换光网络（ASON），使光联网从静态光联网走向动态交换光网络。这样带来的主要好处有：简化网络和节点结构，优化网络资源配置，提高带宽利用率，降低建网初始成本；实现规划、业务指配和维护的自动化，从而降低运维成本，并且可以解决实时、准确维护传输网资源的难题，避免资源搁浅；具备网络和业务的快速保护恢复能力。

随着技术的发展，网络中的光处理、监视和控制能力越来越强，越来越广泛，最终则有可能实现带宽几十 T 的全光网。

1.2 光纤通信系统的主要特点

在光纤通信系统中，作为载波的光波频率比电波频率高得多，而作为传输介质的光纤又比同轴电缆损耗低得多（见表 1.1），因此相对于电缆或微波通信，光纤通信具有许多独特的优点。

1. 频带宽、传输容量大

表 1.1 电缆和光纤的损耗和频带比较

类型		频带（或频率）	损耗（dB/km）	传输容量（话路/线）
粗同轴电缆（ $\phi 2.4/9.4$ ）		1MHz 60MHz	2.42 18.77	1 800
渐变折射率多模光纤	0.85 μm	200~1 000MHz·km	≤ 3	200
	1.31 μm	$\geq 1 000\text{MHz}\cdot\text{km}$	≤ 1.0	
单模 光纤	1.31 μm	>100GHz	0.36	32 000 (2.5Gbit/s)
	1.55 μm	10~100GHz	0.2	

电缆基本上只适用于数据速率较低的局域网(LAN),距离较长的高速局域网($\geq 100\text{Mbit/s}$)和城域网(MAN)必须采用光纤。光纤在 $1\,280\sim 1\,620\text{nm}$ 的近红外波段,具有6个传输窗口,采用密集波分复用技术,这6个窗口从理论上讲可以提供多达10 000个信道。

过去,通信线路是信号传输的技术瓶颈,但是自从使用光缆后,这个问题就不复存在了。光多路传输技术是充分挖掘光纤带宽潜力、扩大通信容量的技术之一。采用多路传输技术可以充分利用光纤带宽,给通信带来巨大的经济效益。目前研究开发的光复用技术有波分复用(WDM)、光时分复用(OTDM)和光码分复用(OCDM)。但OTDM和OCDM技术还不成熟。目前人们采用密集波分复用(DWDM)技术,增加可使用波长的数量,并利用光纤损耗谱平坦,扩大可利用的窗口技术和波长转换技术,实现波长再利用等可使单根光纤的传输速率达到几十Tbit/s,如能进一步利用OCDMA技术,OTDM技术,增加光缆中光纤根数(目前已能达到432或864根每缆)等技术,理论上讲光纤通信的带宽可达到无限。

2. 损耗小、中继距离长

现在,商品化的石英光纤损耗比任何传输介质的损耗都低,为 $0\sim 20\text{dB/km}$;如果将来使用非石英极低损耗传输介质,理论上传输的损耗还可以降到更低的水平。所以光纤通信系统可以减少中继站数目,一方面降低了系统成本和复杂性,更为重要的是可以实现更大的无中继距离。例如已报道的采用分布式拉曼放大技术,可使32波长 $\times 40\text{Gbit/s}$ WDM系统的无中继距离达到250km。

3. 重量轻、体积小

由于电缆体积和重量较大,安装时还必须慎重处理接地和屏蔽问题。在空间狭小的场合,如舰船和飞机中,这个弱点更显突出。然而,光纤重量很轻,直径很小,即使做成光缆,在芯数相同的条件下,其重量还是比电缆轻得多,体积也小得多。通信设备的重量和体积对许多领域,特别是军事、航空和宇宙飞船等方面的应用,具有特别重要的意义。

在飞机上用光纤代替电缆,不仅降低了通信设备的成本,提高了通信质量,而且降低了飞机的制造成本。分析表明,每降低12kg,飞机制造成本就减少27万美元。

4. 抗电磁干扰性能好

光纤的原材料是石英,具有强烈的抗腐蚀性能和良好的绝缘性能,同时自身抗电磁干扰能力强,能够解决电通信中电磁干扰的问题,不受外界雷电以及太阳黑子活动等的干扰,可以通过复合与电力导体高压输电线等形成复合光缆,有利于强电领域的通信系统工作。例如,在电气化铁道以及军事等方面应用。用无金属加强筋光缆非常适合于存在强电磁场干扰的高压电力线路周围、油田、煤矿和化工等易燃易爆环境中使用。

5. 泄漏小、保密性好

在现代社会中,不但国家的政治、军事和经济情报需要保密,企业的经济和技术情报也已成为竞争对手的窃取目标。因此,通信系统的保密性能是用户必须考虑的一个问题。电波传输会因为电磁波泄漏而出现串音情况,容易被窃听,现代侦听技术已能做到在离同轴电缆几千米以外的地方窃听电缆中传输的信号,可是对光缆却困难得多。因此,在要求保密性高

的网络中不能使用电缆；而在光纤中传输的光泄漏非常微弱，即使在弯曲地段也无法窃听。没有专用的特殊工具，光纤不能分接，因此信息在光纤中传输非常安全，对军事、政治和经济都有重要的意义。

6. 节约金属材料，有利于资源合理使用

制造同轴电缆和波导管的金属材料，在地球上的储量是有限的；而制造光纤的石英（ SiO_2 ）在地球上取之不尽。

光纤通信除了上述的一些具体的特点外，还有很多的优点，如光纤的原材料成本低，资源丰富，光纤柔软、重量轻、容易进行铺设，并且光纤的使用寿命长、稳定性好。因此光纤的通信应用范围比较广泛，不仅可以用于电力通信中，而且可以用于工业和军事领域以及其他领域中。

1.3 光纤通信系统简介

目前实用的光纤通信系统，较多采用的是数字编码、强度调制—直接检测的通信系统（IM-DD 系统），这种系统的框图如图 1.2 所示。

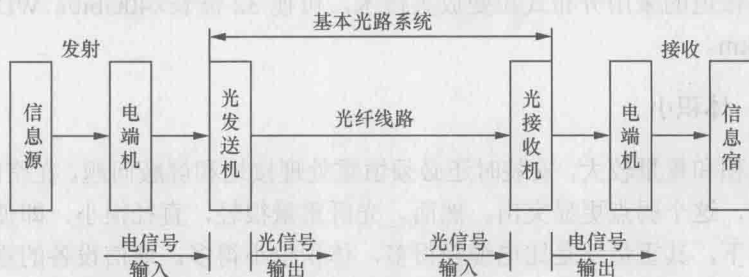


图 1.2 光纤通信系统的构成

图 1.2 所示的是一个方向的传输，反方向传输的结构是相同的。在图 1.2 中，电端机即为复用设备（准同步复用或同步复用），其作用是对来自信息源的信号进行处理，例如模/数变换、多路复用等。光发送机、光纤线路和光接收机构成了可作为独立的“光信道”单元的基本光路系统，若配置适当的接口设备，则可以插入现有的数字通信系统（或模拟通信系统），或者有线通信系统（或无线通信系统）的发射与接收之间；此外，若配置适当的光器件，还可以组成传输能力更强、功能更完善的光纤通信系统。例如，在光纤线路中插入光纤放大器组成光中继长途系统；配置波分复用器和解复用器组成大容量波分复用系统；使用耦合器或光开关组成无源光网络等。下面简要介绍基本光路系统的三个组成部分。

1. 光发送机

光发送机的作用是把输入的电信号转换成光信号，并将光信号最大限度地注入光纤线路。光发送机由光源、驱动器和调制器组成。光发送机的核心是光源，对光源的要求是输出功率足够大，调制速率高，光谱线宽度和光束发散角小，输出光功率和光波长要稳定，器件寿命长。目前，最广泛使用的光源有半导体激光器（或称激光二极管，LD）和半导体发光二极管

(LED)。普通的激光器谱线宽度较宽，是多纵模激光器，在高速率调制下激光器的输出频谱较宽，从而限制了传输的码速和中继距离。一种谱线宽度很窄的单纵模分布反馈(DFB)激光器已经逐渐地广泛应用。

光发送机把电信号转换成光信号的过程是通过电信号对光源进行调制而实现的。光调制有直接调制和间接调制(也称外调制)两种。直接调制是利用电信号注入半导体激光器或发光二极管从而获得相应光信号的，其输出功率的大小随信号电流的大小而变化，这种方式较简单，容易实现，但调制速率受激光器特性所限制。外调制是把激光的产生和调制分开，在激光形成后再加载调制信号，是用独立的调制器对激光器输出的激光进行调制。外调制方法在相干光通信中得到了应用。

2. 光纤线路

光纤线路是光信号的传输媒质，可把来自发送机的光信号以尽可能小的衰减和脉冲展宽传送到接收机。对光纤的要求是其基本传输参数衰减和色散要尽可能小，并要有一定的机械特性和环境特性。工程中使用的是由许多根光纤绞合在一起组成的光缆。整个光纤线路由光纤、光纤接头和光纤连接器等组成。

目前使用的光纤均为石英光纤。石英光纤的损耗—波长特性中有三个低损耗的波长区，即波长分别为 850nm、1 310nm、1 550nm 的三个低损耗区。因此光纤通信系统的工作波长只能选择在这三个波长区，激光器的发射波长、光检测器的响应波长都与其一致。这三个低损耗区的损耗分别小于 2dB/km、0.4dB/km 和 0.2dB/km。

在通信中使用的石英光纤有多模光纤和单模光纤。单模光纤的传输性能比多模光纤好，在大容量、长距离的光纤传输系统中都采用单模光纤。

为适应于不同要求的光纤通信系统，使用的光纤类型有 G.651 光纤(多模光纤)、G.652 光纤(常规单模光纤)、G.653 光纤(色散位移光纤)、G.654 光纤(低损耗光纤)和 G.655 光纤(非零色散位移光纤)等。

3. 光接收机

光接收机的功能是把由发送机发送的、经光纤线路传输后输出的已产生畸变和衰减的微弱光信号转换为电信号，并经放大、再生恢复为原来的电信号。

光接收机由光检测器、放大器和相关电路组成。对光检测器的要求是响应度高、噪声低、响应速度快。目前广泛使用的光检测器有光电二极管(PIN)和雪崩光敏二极管(APD)。

光接收机把光信号转换为电信号的过程是通过光检测器实现的。光检测器的检测方式有直接检测和外差检测两种。直接检测是由光检测器直接把光信号转换为电信号。外差检测是在接收机中设置一个本地振荡器和一个混频器，使本地振荡光和光纤输出的光进行混频产生差拍而输出中频信号，再经光检测器把中频信号转换成电信号。在外差检测方式中，对本地激光器的要求很高，要求光源是频率非常稳定、谱线宽度很窄、相位和偏振方向可控制的单模激光器，其优点是接收灵敏度很高。目前使用的光纤通信系统中，普遍采用强度调制—直接检测方式。外差检测用在相干光纤通信中，虽然外调制—外差检测的方式技术复杂，但其有着传输速率高、接收灵敏度高等优点，所以是一种有应用前途的通信方式。

衡量接收机质量的主要指标是接收灵敏度。它表示在一定的误码率条件下，接收机调整

到最佳状态时接收微弱信号的能力。接收机的噪声是影响接收灵敏度的主要因素。

对于长距离的光纤传输系统，中途还需要中继器，其作用是将经过光纤长距离衰减和畸变后的微弱光信号放大、整形，再生成具有一定强度的光信号，继续送向前方，以保证良好的通信质量。以往光纤通信系统中的光中继器都是采用光-电-光的形式，即将接收到的光信号用光电检测器变换成电信号，经放大、整形、再生后再调制光源，将电信号变换成光信号重新发出，而不是直接把光放大。但随着光放大器（如掺铒光纤放大器）的开发、成熟、使用，光的直接放大已成为可能，也就是说采用光放大器的全光中继和全光网络已为期不远。

1.4 光纤通信系统的分类

1. 按系统传输的信号分

按照光纤通信系统中所传信号的形式可将光纤通信系统分为模拟光纤通信系统和数字光纤通信系统两类。

2. 按光纤通信系统所用光纤分

光纤通信系统的主要传输介质为光纤，而目前在市场上主要有单模光纤和多模光纤两种，所以按所用光纤可将光纤通信系统分为单模光纤系统和多模光纤系统两类。

3. 按光源的调制方式分

通常光纤通信系统将待传送的电信号调制到光源器件（激光器或发光管）上，变为光信号在光纤中传送，按照信号对光源的调制方式，我们还可以将光纤通信系统分为直接调制光通信系统和间接调制光通信系统。

4. 按拓扑结构分

光纤通信系统用来连接一些节点，这些节点通常可能是交换机、终端、计算机、工作站等。光纤通信系统可分为三类：点对点系统、一点对多点系统以及网络（见图 1.3）。

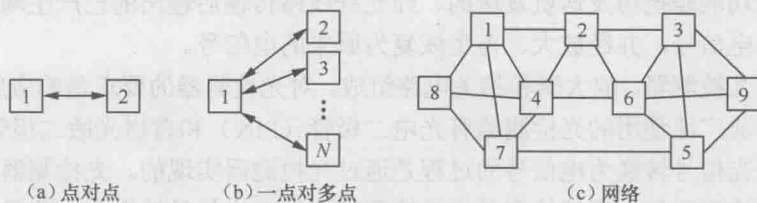


图 1.3 光纤通信系统拓扑结构

在点对点系统中，可能是单向的，也可能是双向的；在一点对多点（设有 N 个工作站）的系统中，其中站 1 可发送信息到所有其他 $N-1$ 个站，也可以接收其他各站发送来的信息，但其他各站之间不能相互通信。该系统的一个特殊情况是广播网络，即一个站可发送信息到所有其他 $N-1$ 个站。

点对点系统和一点对多点系统仅仅是网络的特例。在网络中，每个站可以与其他任一个站进行通信，而绝不仅仅是一个站只能与另外 $N-1$ 个站通信。有时候我们要指出它们之间的

区别,有时候我们通称以上三种情形均为系统或者网络。

5. 按网络服务范围分

传统上,以网络的服务范围把网络分为三类。

(1) 局域网,服务范围 2km,如以太网、信令环和信令总线。

(2) 城域网,服务范围 100km,如电话本地交换网或者有线电视分配系统。

(3) 广域网络,服务范围可达数千千米,如开放系统互连国际网络等。

按上述方法可把光纤通信系统分为局域光纤通信网、城域光纤通信网和广域光纤通信网。

光纤通信系统的分类方法较多,还可以分为光纤通信接入网系统和光纤通信骨干网系统等,这里就不再详述。

1.5 光纤通信系统的应用

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、广播电视网与计算机网,以及其他数据传输系统中,都得到了广泛应用。光纤宽带干线传送网和接入网发展迅速,是当前研究开发应用的主要目标。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、各省二级干线和县以下的支线)、各种专用通信网(如电力、铁道、国防等部门通信、指挥、调度、监控的光缆系统)、特殊通信手段(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、军舰、潜艇、导弹和宇宙飞船内部的光缆系统)。

(2) 构成因特网的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;工业电视系统,如工厂、银行、商场、交通和公安部门的监控;自动控制系统的数据传输。

(4) 综合业务光纤接入网,分为有源接入网和无源接入网。可实现电话、数据、视频(会议电视、可视电话等)及多媒体业务综合接入核心网,提供各种各样的社区服务。

光纤接入技术分为光纤到路边(FTTC)、光纤到楼(FTTB)和光纤到家户(FTTH)。光纤到户是光纤接入的最终目标,它主要解决了通过互联网的主干网到用户桌面的“最后一公里”这一瓶颈现象。在技术不断更新的情况下,光纤到户所需的成本逐渐下降,它的成本逐渐接近于 DSL 及 HFC 网的成本,这些使得 FTTH 的实用化程度有所提高。在我国,光纤到户受到了更广泛的推广,光纤到户在武汉、成都等市广泛地开展,2012 年左右,我国的沿海及内地几座城市逐步掀起了光纤到户的建设热潮。光纤到户被大多数家庭所应用,在相应技术逐步走向成熟化与实用化的今天成本有所降低,FTTH 将以不可阻挡的优势而得到推广。

1.6 光纤通信技术发展现状及展望

1. 光纤通信在我国的发展现状

我国的光纤通信技术在发展的过程中经历了很多的波折和困难,但是随着科学的不断进