



光纤通信

彭利标 主编



增值回报
电子教案



21 世纪高职高专规划教材系列

光 纤 通 信

主编 彭利标

参编 王 青 袁贵民

主审 葛春风



机械工业出版社

本书介绍了光纤通信原理、器件和技术,其内容包括光纤通信系统概论,光的传播基础,光与介质的相互作用,光纤光缆,光纤通信用光发射器件(LED和LD及其组件/模块)、光接收器件(PIN和APD及其组件/模块),光调制、编码、复用和解复用技术,光放大技术,光器件等。介绍了光纤通信系统设计,衰减、色散对系统性能的限制,以及光纤通信用光电子器件实例及使用注意事项,组成光纤通信系统的各种技术应用、系统设计和系统管理,光接收机的组成、噪声分析、性能指标以及系统的总体设计,光纤通信新技术和新型系统,如掺铒光纤放大器、密集波分复用DWDM系统、全光通信网以及非线性光学效应等。

本书内容反映了当前光纤通信技术的发展水平,理论分析深入浅出,文字叙述通俗易懂,图文并茂,注重实用,适合不同层次读者的需要。在每章的讲述中配有例题,章后配有习题,并在附录中给出了部分习题参考答案,帮助读者加深理解。

本书可作为通信及信息类专业本科及专科的教材,也可供从事光纤通信系统和网络研究、规划、设计、使用、管理和维护,光电子器件和光纤通信系统销售及可靠性研究的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

光纤通信/彭利标主编. —北京:机械工业出版社, 2007.3

(21世纪高职高专规划教材系列)

ISBN 978-7-111-19450-7

I. 光... II. 彭... III. 光纤通信 - 高等学校: 技术学校 - 教材
IV. TN929.11

中国版本图书馆CIP数据核字(2006)第070244号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:胡毓坚 责任编辑:董欣 版式设计:冉晓华

责任校对:王欣 封面设计:刘吉维 责任印制:杨曦

北京机工印刷厂印刷

2007年3月第1版第1次印刷

184mm×260mm·16.5印张·406千字

0 001—4 000册

标准书号:ISBN 978-7-111-19450-7

定价:25.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

销售服务热线电话:(010) 68326294

购书热线电话:(010) 88379639 88379641 88379643

编辑热线电话:(010) 88379739

封面无防伪标均为盗版

21 世纪高职高专 通信类专业规划教材编委会

主 任	周祥瑜				
副 主 任	伍湘彬	张中洲	杨元挺	张黎明	
	安志鹏	俞 宁	董维佳	任德齐	
委 员	(按姓氏笔画排序)				
	丁龙刚	冯国莉	余 周	杜志勇	张红兵
	易 谷	周雪利	彭利标	陈立万	梁德厚
秘 书 长	胡毓坚				
副秘书长	陈 良				

出版说明

为了贯彻国务院发〔2002〕16号文件《国务院关于大力推进职业教育改革与发展的决定》的精神,进一步落实《中华人民共和国职业教育法》和《中华人民共和国劳动法》,实施科教兴国战略,大力推进高等职业教育改革与发展,我们组织力量,对实现高等职业教育培养目标和保证基本教学规格的文化基础课程、专业技术基础课程和重点建设专业主干课程的教材进行了规划和编写。

本套教材内容涵盖了高职高专院校计算机类、电子信息类、通信类、自动化类、市场营销类的专业基础课、专业课以及选修课。其中,通信类专业规划教材由“21世纪高职高专通信类专业规划教材编委会”组织编写。该套教材从实际应用的角度出发,结合工程实际需要,为高职高专通信类的学生提供了学习通信技术基础和现代通信技术的教科书。

通信类专业规划教材的指导思想及编写原则如下:

1. 课程整合,精简课程

在充分调研IT行业对通信专业学生能力结构具体要求的基础上,根据高职高专培养高技能人才的定位,以社会实际需要为目标,加强基本知识、基础理论和基本技能的教学。同时,考虑理论对实践的指导性,以“必须够用”为原则,将通信类专业课程进行全面整合,精简课程,强调知识技能的直接应用。

2. 教材内容统一规划

规划教材从通信技术必须具备的基本知识和应掌握的基本技能出发,合理安排每一门课程的知识点、技能点。将从程控交换到基站建设、光纤通信、终端设备等专业技术,恰当衔接,避免不必要的课程重复。技术基础课突出“新”的教学法——一体化教学模块(单元);专业基础与专业技能课突出“新”的知识、“新”的技术,力求与行业需要相适应。

3. 结合行业资格证书

课程设置、教材编写与通信行业紧密结合。参照通信行业职业资格证书的要求,结合专业应用,用深入浅出的物理概念来替代那些难理解的理论推导。

4. 注重实训环节

注重理论与技能技术的有机结合,注重实训环节,将技能培训贯穿于整套教材。将电子基础理论与通信专业技术紧密结合,让学生在理论指导下进行技术实践,学好专业技术。

5. 编写模式合理先进

教材具体编写模式借鉴国外职教先进经验,技术基础课以能力模块(单元)来设计,每一模块(单元)设教学目标、正文、应知测试、应会测试等环节,强调案例分析,并加强实训实验环节的考核,体现以能力为本位,以学生为中心的职教理念。

通信类专业规划教材以技能培养为主,技能的设定由各主编结合企业要求组织讨论决定。技术基础课程的教材分单元展开,专业基础课程及专业技能课程的教材突出先进实用技术,强化技能训练和可操作性,同时注意设备、实训环境的大众化。

本套教材可作为各类高职高专院校的教材,也可作为各类培训班的教材。

机械工业出版社

前 言

近年来, 光纤通信凭借其自身的优越性及相关学科的支持, 得到了飞速发展, 在人类向信息社会迈进的过程中扮演着越来越重要的角色。纵观推动当今电信业发展的主要技术, 很少有像光纤传输系统这样能够引发如此剧烈的通信变革。光纤通信技术的迅速发展和广泛应用, 不仅极大地提高了信息的传输容量, 给通信领域带来翻天覆地的变化, 而且与卫星通信、移动通信一起构成以光纤通信为主体的长途通信三大支柱。

20 世纪 90 年代中期以前推出的光波系统是以电时分复用为基础的单信道系统, 借助于这样的系统, 可将传输速率每五年提高九倍。波分复用 (WDM) 技术和掺铒光纤放大器 (EDFA) 的实用化使光纤通信面目一新。1996 年首次实现了每秒 1 万亿比特 (1Tbit/s) 的传输速率, 同时也使建立以波长路由为基础、具有高度灵活性和生存性的 WDM 全光通信网成为可能, 光交叉连接、光分插复用的概念应运而生。除此之外, 新型的光电器件、新兴技术和新型的系统也层出不穷, 获得迅速发展。

本书力求理论体系的系统性和完整性, 采取概念论述和简单数学推导相结合的方法, 循序渐进、由浅入深地对光纤的传输理论、光源和光源的调制、光接收机的原理进行了较深入的讲述。第 1 章光纤通信系统概论, 主要介绍光纤通信技术的发展, 光纤通信系统的组成, 光发射机、光调制器、光纤 (光缆)、光放大器、光接收机的概念, 光纤通信系统的特点及分类。第 2 章光的传播特性, 主要介绍光的基本性质、几何光学、光在介质中的传播现象、波导理论简介等。第 3 章光纤和光缆, 主要介绍光纤的结构与类型, 光纤的传输原理、传输特性, 如衰减特性、色散特性、非线性等, 还介绍了几种典型的光纤和光缆。第 4 章光源和光发射机, 主要介绍光纤通信对光源的基本要求, 光源的发光原理, LED 和 LD 及其组件的结构特点, 光的调制方法, 常用的光调制器以及对光源的保护等。第 5 章光放大器, 介绍了几种典型的光纤放大器, 重点介绍了掺铒光纤放大器, 介绍了光纤放大器的典型应用, 使用时的注意事项, 光纤放大器的主要参数等。第 6 章光探测器件及光接收机, 介绍了光电探测原理及参数计算, 常用的光电探测器件, 如 PIN 光电二极管、雪崩光电二极管、集成光学光电探测器等, 还介绍了光接收组件, 包括模拟和数字光接收组件、光收发一体模块、光接收机的组成及主要性能指标。第 7 章光纤通信器件, 主要介绍了光纤通信系统中常用的光无源器件, 包括光纤连接器、耦合器、滤波器、复用/解复用器、光开关、光隔离器、光分插复用器等。第 8 章多信道复用技术, 主要介绍调制、信道编码、信道复用、光调制技术、光波分复用、光时分复用、光码分复用及扩频技术。第 9 章光纤系统的总体设计, 讲述了系统组成形式, 设计时的注意事项, 几种常用网络形式的功率和色散预算等。第 10 章光电子器件组件实例, 主要内容包括光发射模块组件、光接收模块组件、激光器组件、光收发一体模块组件、光调制器、光放大器等器件模块实例。本书免费提供电子教案, 读者可到机械工业出版社网站 (<http://www.cmpbook.com>) 下载。

本书由彭利标主编, 并负责全书的统稿工作。第 2 章、第 3 章由天津电子信息职业技术学院的王青编写, 第 8 章、第 9 章由袁贵民编写, 其余各章由天津理工大学中环电子信息学院的彭利标编写。中国科学技术大学信息科学技术学院的彭鹏为本书的编写提供了宝贵建议, 并演

算了大部分习题；天津大学的葛春风博士担任主审。在编写过程中，本书选取了光纤通信技术的最新素材，收编了大量有价值的光纤通信工程数据和图表。虽然作者多年来从事光纤通信的教学和技术研究，但由于光纤通信技术发展十分迅速，加之作者水平有限，书中难免存在遗漏和错误，敬请读者批评指正。

作 者

目 录

出版说明

前言

第1章 光纤通信系统概论 1

1.1 光纤通信技术简介 1

1.1.1 光纤通信技术的发展 1

1.1.2 电缆网络的缺点 2

1.1.3 光纤传输网的关键技术 4

1.2 光纤通信系统的组成 5

1.3 光纤通信系统的分类 8

1.4 习题 10

第2章 光的传播特性 11

2.1 光的基本性质 11

2.1.1 光的波动性 11

2.1.2 光的粒子性 13

2.2 几何光学 14

2.2.1 光的反射和折射 15

2.2.2 光的传播 17

2.3 光在介质中的传播现象 20

2.3.1 平面电磁波 20

2.3.2 麦克斯韦波动方程 20

2.3.3 菲涅尔方程 21

2.3.4 法布里-珀罗 (Fabry-Perot) 光学谐振器 25

2.3.5 衍射光栅 26

2.3.6 光的偏振形式 27

2.3.7 光在各向异性介质中的传播 29

2.3.8 非线性光学效应 31

2.4 波导理论简介 31

2.4.1 波导条件 31

2.4.2 单模和多模波导 32

2.5 习题 33

第3章 光纤与光缆 35

3.1 光纤的结构与类型 35

3.1.1 光纤的结构及各部分的作用 35

3.1.2 光纤的种类 36

3.1.3 几种常用石英光纤的结构及传输特征 37

3.2 光纤的传输原理 41

3.2.1 光在光纤中传输的基本性质 41

3.2.2 光纤的模式 42

3.2.3 单模光纤的基本特性 44

3.3 光纤的传输特性 45

3.3.1 光纤的衰减特性 45

3.3.2 光纤的色散特性 48

3.3.3 光纤的比特率与带宽 51

3.3.4 光纤的非线性效应 54

3.4 几种常用的典型光纤与光缆 56

3.4.1 几种常用的光纤及特点 56

3.4.2 光纤的选择 60

3.4.3 光缆 60

3.5 习题 64

第4章 光源和光发射机 66

4.1 光发射机概述 66

4.1.1 光纤通信系统对光源的基本要求 66

4.1.2 光源的发光原理 67

4.2 半导体光源器件的结构 69

4.2.1 半导体发光二极管及发光二极管组件 70

4.2.2 半导体激光二极管 75

4.2.3 激光二极管组件 80

4.3 光的调制 82

4.3.1 调制信号对光源的调制方法 82

4.3.2 常用的光调制器 90

4.3.3 光调制器的主要参数及需要注意的问题 91

4.3.4 对激光器的保护 92

4.4 习题 94

第5章 光放大器	95	6.5 光发射接收模块	130
5.1 几种常用的光放大器	95	6.5.1 光发射模块	130
5.1.1 常规传输光纤放大器	95	6.5.2 光接收模块	132
5.1.2 半导体光放大器	96	6.5.3 光收发一体模块	137
5.1.3 稀土掺杂光纤放大器	96	6.6 光接收机	139
5.2 掺铒光纤放大器 (EDFA)	98	6.6.1 光接收机的组成及作用	139
5.2.1 EDFA 的泵浦特性	98	6.6.2 光接收机的主要性能指标	140
5.2.2 掺铒光纤放大器的特点	99	6.7 习题	142
5.2.3 实用 EDFA 的组成结构	99		
5.3 EDFA 的应用	102	第7章 光纤通信器件	143
5.3.1 几种典型应用	102	7.1 光纤连接器	143
5.3.2 多信道应用	103	7.1.1 活动光纤连接器	143
5.3.3 超窄光脉冲放大	103	7.1.2 光纤接头	146
5.4 EDFA 的特性参数及使用注意		7.1.3 几种连接方式的性能比较	146
事项	103	7.2 光纤耦合器	147
5.4.1 光纤放大器的特性参数	103	7.2.1 几种常用的光纤耦合器	147
5.4.2 光纤系统中使用 EDFA 的注意		7.2.2 光纤耦合器对线路的影响	148
事项	108	7.3 光纤滤波器	149
5.5 光放大器的级联	109	7.3.1 光纤滤波器概述	149
5.5.1 级联放大器的噪声	109	7.3.2 F-P 滤波器	150
5.5.2 级联放大器光纤的色散及非线性		7.3.3 M-Z 滤波器	152
性	110	7.3.4 光栅滤波器	153
5.5.3 级联放大器的增益均衡	111	7.3.5 光纤环路谐振带通滤波器	155
5.5.4 EDFA 的级联使用实例	111	7.3.6 几种调谐滤波器的性能比较	155
5.6 习题	112	7.4 波分复用/解复用器	156
		7.4.1 几种常用的波分复用器	156
		7.4.2 几种常用的解复用器	157
第6章 光探测器件及光接收机	113	7.5 其他光学器件	160
6.1 光电探测原理	113	7.5.1 光开关	160
6.1.1 光电探测器的类型	113	7.5.2 光环行器	164
6.1.2 光电探测原理及参数计算	114	7.5.3 光隔离器	164
6.2 光电探测器件	116	7.5.4 光分插复用器	165
6.2.1 PIN 光电二极管	116	7.5.5 波长转换器	166
6.2.2 雪崩光电二极管	119	7.5.6 光交叉连接器	167
6.2.3 肖特基光电二极管	122	7.6 习题	167
6.2.4 MSM 光电探测器	122		
6.3 集成光学光电探测器	123		
6.4 光接收组件	125	第8章 多信道复用技术	169
6.4.1 光接收组件的基本组成	125	8.1 概述	169
6.4.2 光接收组件的特性	126	8.1.1 调制	169
6.4.3 模拟光接收组件	128	8.1.2 信道编码	170
6.4.4 数字光接收组件	129	8.1.3 信道复用	173

8.2 光调制技术	174	10.2.1 PT2609B/PT2606A/B InGaAs-PIN/T 光接收组件	223
8.2.1 模拟强度光调制	174	10.2.2 PT41AB-CD-EFG * 数字光接收 组件	224
8.2.2 数字强度光调制	174	10.2.3 PT2111/PT2112 系列 InGaAs PIN PD	226
8.2.3 相干系统光调制	175	10.3 激光器组件实例	226
8.3 光复用技术	176	10.3.1 PT33 系列激光器组件	226
8.3.1 光波分复用	176	10.3.2 PT3 * 43 系列激光器组件	227
8.3.2 光时分复用	177	10.3.3 PT3343、PT3357 激光器组件 (模拟应用)	228
8.3.3 光码分复用	180	10.3.4 PT1610 系列激光器组件(模拟应 用)	229
8.4 扩频通信	180	10.3.5 1611P 激光器组件(模拟应 用)	230
8.4.1 扩频通信概述	180	10.3.6 1702A 激光器组件(模拟应 用)	231
8.4.2 伪随机码	181	10.3.7 1750A 激光器组件(模拟应 用)	233
8.4.3 几种常用的扩频方式	183	10.3.8 1861A 1310nm 激光器组件	234
8.4.4 码分多址	186	10.4 光收发一体模块组件实例	236
8.5 习题	189	10.4.1 PT7323 系列 SFT-LC 光收发一体 模块	236
第 9 章 光纤系统的总体设计	191	10.4.2 PT83 系列单纤双向光收发组 件	237
9.1 系统设计的总体考虑	191	10.4.3 PT7 * * * 系列光收发模块	238
9.1.1 选择路由、设置局站	191	10.5 光调制器实例	243
9.1.2 确定系统的制式、传输速率和 光纤的选型	191	10.5.1 2.5Gbit/s LiNbO ₃ 调制器	243
9.1.3 选择合适的设备、核实设备的性 能指标	192	10.5.2 10Gbit/s LiNbO ₃ 调制器	244
9.1.4 系统结构类型	193	10.6 光放大器实例	244
9.1.5 系统设计方法	196	10.6.1 PTA5101 掺铒光纤放大器	244
9.2 系统的设计限制	198	10.6.2 PTA5102 掺铒光纤放大器	246
9.2.1 损耗受限系统和色散限制系统	198	附录	248
9.2.2 功率预算和色散预算	199	附录 A 常见的物理常数	248
9.3 典型光纤通信系统的设计	202	附录 B 损耗的百分数(%)与分贝(dB) 的换算	248
9.3.1 单信道光纤通信系统的设计	202	附录 C ITU-T 对于 WDM 系统波长的安排	248
9.3.2 DWDM 系统工程设计	205	附录 D PDH 与 SDH 速率等级	250
9.4 光端机设备举例	208	附录 E 部分习题参考答案	250
9.4.1 光端机的组成	208	附录 F 单位换算关系	252
9.4.2 光端机实例	212	参考文献	253
9.5 习题	217		
第 10 章 光电子器件组件实例	219		
10.1 光发射模块组件实例	219		
10.1.1 STM-16 光发射机模块	219		
10.1.2 PTS343/PT5553 光发射模块	220		
10.1.3 3641P 光发射机模块	221		
10.2 光接收模块组件实例	223		

第1章 光纤通信系统概论

光纤通信系统是指利用激光作为信息的载波,通过光导纤维来传输信息的通信系统。光纤通信作为一种新兴的通信技术,一开始就引起人们的极大兴趣和关注,主要是因为光纤通信有以下突出优点:光波频率很高,其波长在近红外区,即波长在 $800\sim 1800\text{nm}$ 左右;光纤传输带宽很宽,故传输容量很大,可以进行图像、数据、传真、电话、打印、控制等多种业务,理论上在一根光纤中能传输上亿门电话或上万套电视节目;光信号不受电磁干扰,光纤线路可随高压电缆架空敷设,保密性好,不怕雷击,耐高温,抗腐蚀,不易受潮,工作十分稳定;光纤在传输光信号的过程中损耗很低,仅是电缆损耗的几十分之一;光纤通信可用于国防、电力、铁路、防爆等重要工作场所的通信;制造光纤的材料来源丰富,由于光纤采用非金属材料,所以可节约大量有色金属;光纤芯的直径很小,在微米的数量级,所以光纤的重量很轻,体积很小,可节省大量材料,而且光纤的可绕性也较好。

1.1 光纤通信技术简介

光纤(Optical Fiber)是现代通信网络中信息的最佳传输介质,光纤通信网(Optical Fiber Communication Network)是信息高速公路的骨干网,也是全球通信的主体发展项目。

1.1.1 光纤通信技术的发展

1964年,在英国 Harlow ITT 实验室工作的一位年轻的英籍华人工程师高锟提出,人们应该能够发送高速信息光脉冲到一根纤细的玻璃丝中,并做了一系列实验,证明了这一想法是可实现。当时光纤的损耗为 3000dB/km ,高锟博士还指出:只要设法消除玻璃中的杂质,做出衰减低于 20dB/km 的光纤是可能的,后来这位英籍华人工程师高锟被誉称为“光纤通信之父”。1970年美国康宁玻璃公司生产出 20dB/km 的低损耗传输光纤,同一年,贝尔实验室研制成功了在室温下可连续工作的激光器,此后光纤的损耗不断降低,1972年降至 4dB/km ,1973年降至 1dB/km ,1976年降至 0.5dB/km ,到目前为止,小于 0.3dB/km 的光纤已经被广泛使用。总揽全局,光纤通信技术大致可分为三个发展阶段。

第一阶段是从1970年至1979年,光导纤维与半导体激光器的研制成功,使光纤通信技术由起步逐渐成熟,并进入实用化阶段。在此期间,光纤的传输质量不断提高,传输损耗逐年下降,带宽不断增加。在 $0.85\mu\text{m}$ 波段,光纤的传输损耗已降至 2dB/km 左右。光纤的生产从带宽较窄的阶跃型折射率光纤转向带宽较宽的渐变型折射率光纤。另外,通信光源的寿命不断增长,光源和光电检测器件的性能不断改善以及光纤和光电子器件的发展,为光纤传输系统的诞生奠定了基础。1977年美国亚特兰大的光纤市话局间中继系统可以称为是世界上第一个光纤通信系统,当时其数据传输速率为 44.763Mbit/s ,传输距离为 10km 。

第二阶段是从1979年至1989年,此阶段是光纤通信技术快速发展的年代,光纤技术取得了进一步突破,其传输损耗降到 0.5dB/km 以下。光纤传输波长由 $0.85\mu\text{m}$ 波段迅速转向 $1.31\mu\text{m}$ 波段,由多模光纤转向单模光纤,由短波长向长波长转移。光纤数字系统的传输速

率不断提高, 光纤的连接技术和器件寿命等问题都逐步得到解决, 光纤传输系统与光缆线路建设逐渐进入高潮。各种速率的光纤通信系统如雨后春笋般地在世界各地建立起来, 显示出了光纤通信的优越性, 并很快替代了电缆通信系统, 成为电信网络中重要的传输手段。在此阶段, 波分复用系统、相干光通信系统、光放大器等技术也受到人们的关注, 并投入了大量的人力和物力进行研究。

1989 年至今为第三个发展阶段, 光纤数字系统由准同步数字体系 (Plesiochronous Digital Hierarchy, PDH) 向同步数字体系 (Synchronous Digital Hierarchy, SDH) 过渡, 数据传输速率进一步提高。1989 年掺铒光纤放大器 (Erbium-Doped Fiber Amplifier, EDFA) 的问世, 给光纤通信技术带来巨大变革。EDFA 的应用不仅解决了由于长距离光纤通信损耗对信号的放大问题, 而且为光源的外调制、波分复用器件、色散补偿器件等提供能量补偿。这些网络元件的应用又使得光纤传输系统的调制速率迅速提高, 并促成了光波分复用 (Wavelength Division Multiplexing, WDM) 技术的实用化。由于掺铒光纤放大器是工作在波长为 $1.55\mu\text{m}$ 波段, 经过实验证明, 在 $1.55\mu\text{m}$ 波段光纤的传输损耗要比 $1.31\mu\text{m}$ 波段更低, 从而使 $1.55\mu\text{m}$ 波段的光纤通信技术得到更快发展。

在当今的信息时代, 通信业务和信息量爆炸式增长, 通信线路越显拥挤, 只有光纤通信才是解决通信线路拥挤的惟一出路, 所以世界上所有新建的通信网干线均采用光纤光缆作为传输介质。由于波分复用 WDM 技术和光纤技术的迅猛发展, 光纤的信息传输率迅速提高, 信息传输率为 5Gbit/s 的光纤通信系统早已在横跨太平洋的海底光缆中使用。1999 年阿尔卡特进行了 $32 \times 10\text{Gbit/s}$, 传输距离为 400km 的全光传输实验, 2002 年阿尔卡特在 C 波段 (常规波段) 和 L 波段 (长波段) 又进行了 10.2Tbit/s 传输距离为 $3 \times 100\text{km}$ 的传输实验。电路交换逐渐被具有路由器功能的分组交换所取代, 正朝着光交换和电信网络的全光化趋势发展。

由于光电子技术、现代通信技术和计算机技术的发展, 并逐渐成熟, 世界光纤市场和光电子器件市场大幅度增长, 而价格也急剧下降。 10Gbit/s 的高速集成电路已经开发出来, 200Gbit/s 的晶体管和 40Gbit/s 的集成电路已逐渐成熟, 光纤通信产业方兴未艾。光纤在 $1280 \sim 1620\text{nm}$ 的近红外波段具有 5 个低损耗传输窗口, 采用密集型的波分复用技术 (Dense Wavelength Division Multiplexing, DWDM), 这 5 个传输窗口可提供多达 10000 个信道。因此所谓“通信线路是信号传输的技术瓶颈”之说法自从使用了光纤、光缆作为传输介质之后就不复存在了。

随着我国国民经济的持续、快速发展, 通信业务的种类越来越多, 信息传送的需求量也越来越大。我国光纤通信的产业规模也在不断壮大, 产品结构覆盖了光纤传输设备、光纤与光缆、光电子器件以及各类施工、测试仪器仪表与专用工具等。光纤通信作为一种高新技术产业, 将以更快的速度发展。

1.1.2 电缆网络的缺点

早期广泛应用于通信技术的电通信网络正被光纤通信网络所取代。与光纤通信网络相比, 电通信网络有许多致命的缺点。

(1) 电气危害和电磁干扰比较严重

由于电通信网络, 特别是局域网 (Local Area Network, LAN) 部件通常与交流电源或照明电路直接接触, 因此 LAN 电缆和部件上积累的静电荷会耦合到通信电缆系统上, 产生高

能量瞬变脉冲和高频电磁干扰、静电放电、LAN 部件各接地点之间的电位差等，这是由于电缆的导电性、电磁兼容性和屏蔽能力差所引起的。正是由于这些危害和干扰，影响了通信网的正常工作，甚至导致 LAN 部件或联网计算机的损坏。

(2) 传输损耗大、带宽窄

为了更清楚地比较电缆与光缆的传输特性，表 1-1 给出了电缆与光缆每公里 (km) 损耗的分贝 (dB) 数和传输带宽，比较表中的数据可以看出，电缆的损耗明显比光缆的损耗大得多，有的甚至大几个数量级。所以在信号传输中，特别是在网径 (区域) 较大的局域网 (LAN) 和城域网 (Metropolitan Area Network, MAN) 中，只有使用光纤光缆作为传输介质，才能远距离传输信号，减少传输线路上的损耗和中继设备。

表 1-1 电缆与光缆的损耗和传输带宽的比较

类 型	频带或带宽距离积	损耗 (dB/km)
对称电缆	4kHz	2.06
细同轴电缆 (Φ1.2/4.4)	1MHz	5.24
	30MHz	28.70
粗同轴电缆 (Φ2.4/9.4)	1MHz	2.42
	60MHz	18.77
0.85μm 波长多模光纤	(200 ~ 1000) MHz·km	≤3
1.31μm 波长多模光纤	≥1000MHz·km	≤1.0
1.31μm 波长单模光纤	100GHz	0.36
1.55μm 波长单模光纤	10 ~ 100GHz	0.2

(3) 保密性差

通信网络中信息传输时的保密性能是通信用户必须考虑的一个主要问题。现代社会中，不但国家的政治、军事、经济情报等需要绝对保密，就是企业的经济和技术情报也可能成为竞争对手的窃取目标。局域网中信息窃取的方式常有下列途径：直接接入式窃听，窃听计算机和终端、电缆系统辐射的电磁场。对于直接接入式窃听方式，可采取保密口令、信息加密等安全技术来解决；而对于利用辐射的电磁场进行的窃听方式，虽然可以采用加强电磁屏蔽的技术措施进行防范，但电缆系统的完全屏蔽是很困难的。现代窃听技术可以做到离同轴电缆几公里以外的地方来获取电缆中传输的信号内容，但对光缆的窃听却很困难，所以光纤通信系统要比电缆通信系统传输信号的保密性能好得多。

(4) 电缆的体积和重量大

由于电缆的线芯较粗，成缆后体积大，重量较重，同时为了减少接地电位差，还必须慎重处理接地点，还要考虑信号线的绝缘和屏蔽等问题，所以现场施工安装电缆时很不方便，特别是在空间狭小的场合更是如此。

通信用的光纤是用石英玻璃或塑料制成的直径很小的纤维，直径只有微米 (μm) 数量级，其体积很小，重量很轻。而且光纤又是极好的电绝缘材料，同时光信号在光纤中传输时发生全反射，不产生信号泄漏，所以不存在电气危害、电磁干扰、保密性差等问题，因此光纤是迄今为止最好、最理想的信号传输媒介。

从以上几个主要方面可以看出，电缆只能用于码速率低于 100Mbit/s、带宽在几十千赫

兹至几十兆赫兹的低速局域网 LAN，而光缆可用于码速率高于 100Mbit/s、甚至可以用于 100Gbit/s 的高速城域网 MAN 和广域网（Wide Area Network, WAN）。

1.1.3 光纤传输网的关键技术

光纤传输网的关键技术主要有光接点技术（包括网络接点和接入接点），除接点技术外，还有全光放大中继技术、光多路传输技术、波长选择和波长转换技术、光交换技术、光分插复用技术、网络控制和网络管理技术、集成光学和光纤光栅技术等，以下简单介绍几个主要光纤传输网中的关键技术。

(1) 全光放大中继技术

光纤通信系统的传输距离受光纤的传输损耗和色散延迟的限制，为了将信号传输得更远，在传统的光纤传输系统中，均采用光-电-光转换再生中继器传输，这不仅使通信设备复杂化、成本上升，而且还影响光纤传输优势性能的发挥。若采用光放大器直接在光路上对光信号进行放大传输，即全光中继技术，可节省更多的线路设备，提高经济效益，同时更显出光纤传输的优点。氟基掺铒光纤放大器（Erbium-Doped Fiber Amplifier, EDFA）能在 1530 ~ 1560nm 波长范围内提供相当平坦的增益。如果将 EDFA 再加入增益均衡，能使波长范围扩展到 1620nm，可在 1530 ~ 1620nm 波长范围内提供相当平坦的增益，带宽可达 90nm（约 10^{13} Hz）。目前采用色散补偿、前向纠错和 EDFA 前放和后放、远端泵浦前放和后放技术，能使传输率达 2.5Gbit/s 无中继传输距离达 529km。

(2) 光多路传输技术

为了解决信道的传输容量问题，光纤通信系统中大多采用光复用技术。光复用技术有波分复用（WDM）、光时分复用（Optical Time Division Multiplexing, OTDM）、光码分复用（Optical Code Division Multiplexing, OCDM）。为了进一步提高传输容量，还可以采用密集型波分复用 DWDM 技术。

(3) 波长选择和波长转换技术

在波分复用（WDM）技术中，波长 λ 的数目就是信道的数量，在光纤通信系统中，可以用光滤波器对有用波长进行选择。若有相同波长的两个信道从同一端口输出时，就会造成波长争用阻塞现象，因此必须将其中一个信道的波长转换成另一个波长，以避免波长争用阻塞现象的发生，此时即要用到波长转换技术。

(4) 光交换技术

公众电话交换网（Public Switched Telephone Network, PSTN）采用电路交换技术，计算机网络是采用分组交换技术，若在光纤通信网中采用光交换技术，就可体现光纤通信系统的传输速率高、容量大、抗干扰能力强等优点。

(5) 光分插复用技术

在光纤通信系统的波分复用系统中采用光分插复用技术，可避免传输信息过程中不必要的解复用过程，以简化节点硬件的结构，减少相关的管理操作，增加网络节点的吞吐容量。

(6) 网络控制和网络管理技术

采用光传输信道后，需要开发新的网络控制和网络管理技术，例如光信道的实现、光信道的调节（波长分配与管理）、光网络层结构、光网络节点和接口技术等。

(7) 集成光学技术

全光网络的构成中，离不开各种不同功能和类型的光学器件，这些器件通常用来完成信

号的发送、传输和接收任务，如光发射/接收器、光波分复用/解复用器、光滤波器、波长转换器、光放大器、色散补偿器等。

以上讨论的这些关键技术是光纤通信的基础，它们都得益于超纯石英玻璃纤维的制作和半导体激光器的产生。

1.2 光纤通信系统的组成

一个实用的光纤通信系统，需要配置用来完成各种功能的电路、设备及辅助设施，组成一个通信网络实体之后才能正式投入实际运行，如接口电路、复用设备、管理系统以及供电设施等。

光纤通信系统要根据用户的需求、传送的业务种类以及所采用的传输体制的技术水平等来确定具体的系统结构。因此光纤通信系统的具体结构形式多种多样，但其基本结构是确定的，图 1-1 给出了光纤通信系统的基本结构示意图。

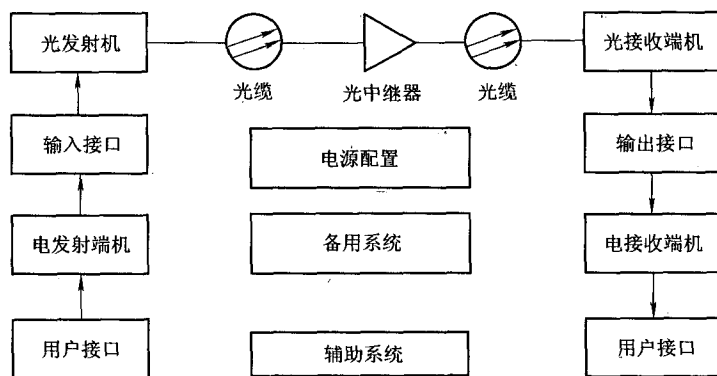


图 1-1 简化的光纤通信系统模型

从光纤通信系统的组成框图中可以看出，光纤通信系统主要由光发射机、传输光纤（光缆）和光接收机三个主要部分组成。在该系统中，其电/光和光/电转换的方式通常是强度调制和直接检测（Intensity Modulation with Direct Detection, IM/DD）。其实现过程如下：输入的电信号既可以是模拟信号，如视频图像信号、音频语言信号等，也可以是数字信号，如计算机数据、PCM（Pulse Code Modulation）编码信号等。调制器将输入的电信号转换成适合驱动光源器件的电流信号，并用来驱动光源器件的发光强度，直接对光源器件进行强度调制，完成电/光转换的功能。光源输出的光信号直接耦合到传输光纤（光缆）中，经过一定距离的光纤传输后送达接收端。在接收端，光电检测器对输入的光信号进行直接检测，将强度随信息变化的光信号转换成相应的电流信号，再经过放大、再生恢复等电信号处理过程，以弥补线路传输过程中带来的信号损伤，如损耗、波形畸变等，最后输出和原始输入信号相一致的电信号，完成整个信息的传送过程。

1. 光发射机

光发射机的组成示意图如图 1-2 所示，它由将带有信息的电信号转换成光信号的转换装置和将光信号送入光纤的耦合传输装置组成。光发射组件是光发射机的主要部件，而光源（LED 或 LD）是组件的核心。光纤通信系统中所用光源，其激发的发射波长必须在传输光纤

的低损耗窗口波段，例如 $0.85\mu\text{m}$ 短波长波段， $1.31\mu\text{m}$ 、 $1.55\mu\text{m}$ 长波长波段；光源的发射功率要足够大，可靠性要高，寿命要长，能批量生产，价格便宜；调制特性和发光/消光比特性要好；光源必须轻巧，防振性能好，适应温度和湿度的变化。半导体光源正好满足这些要求，所以光纤通信系统所用的光源几乎都采用半导体光源。

光发射机的工作过程如图 1-2 所示，光发射组件由直流偏置电源将激光二极管 LD 偏置在线性部分，由信源信息产生的基带信号经变换后形成调制信号 RF 输入，经放大器放大，再通过阻抗匹配后，对激光二极管 LD 进行强度调制，使激光二极管 LD 产生的光强随调制信号 RF 的变化而变化，即变成了已调光。然后通过光隔离器进行光隔离，防止光信号反射回光源。再由光纤耦合器连接到光纤内进行传输。在光发射组件中，通常要对激光二极管 LD 所发出的平均光功率进行功率监测，保证激光二极管 LD 发出的光强均匀。这样做的目的，一是防止光功率太大而缩短激光二极管 LD 的寿命，甚至损坏激光二极管；二是防止激光二极管 LD 所发出的平均光功率太低而影响接收效果。为了保证激光二极管 LD 正常工作，还要在光发射组件中设置温度控制系统，使光发射组件在恒温下工作，以保证光发射组件正常工作时的稳定性。

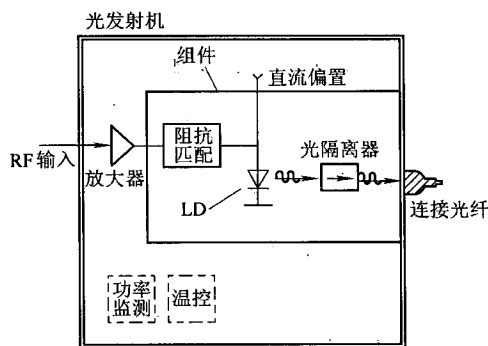


图 1-2 光发射机主要组成示意图

2. 光调制器

光纤通信系统对光调制器的要求是：高调制速率和宽调制带宽；低驱动电流和低插入损耗以及高消光比。半导体光源的调制特性一般不能完全满足这些要求，必须使用外调制器。目前光纤通信系统中通常使用的是铌酸锂

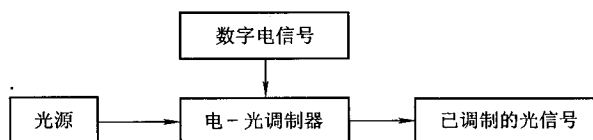


图 1-3 M-Z 强度外调制器的工作示意图

(LiNbO_3) 电-光调制器，称这种外调制器为 M-Z (Mach-Zehnder modulator) 强度调制器，它实现了对光信号的强度调制，其工作过程如图 1-3 所示。光源发出连续的光载波与待传输的数字（或模拟）电信号分别送入电-光调制器，在调制器的输出端得到已调制的光信号。外调制器的特点是数字电信号不再作为激光二极管光源的驱动电流，而是把数字信号加在电-光调制器的电极上，使单偏振的连续光转换成随调制信号变化的光输出信号。

3. 光纤(光缆)

光纤（光缆）是光纤通信系统中光波传输的介质，光纤是由高折射率的光纤芯和低折射率的包层及护套构成，其截面结构示意图如图 1-4a 所示。按制造光纤材料的不同，光纤可分为石英（ SiO_2 ）光纤、多组分玻璃光纤、全塑料光纤和掺杂光纤；按折射率分布情况的不同，光纤可分为阶跃折射率（SI）光纤和渐变折射率（GI）光纤；按传播光波模式数量的多少，光纤可分为单模（SM）光纤和多模（MM）光纤。不同类型的光纤其传输特性和传输无中继距离的长短也不同。在实际应用中，为了便于安装和敷设，常常将多根光纤按一定的结构排列组成光缆。光缆的结构品种繁多，根据光纤芯数目的不同，有双芯、4 芯、8 芯、12

芯、18 芯、24 芯、32 芯、48 芯等；根据光缆的不同用途，光缆的结构形式也多种多样。图 1-4b 给出的是我国较为普遍采用的层绞式和骨架式两种光缆的结构示意图。

4. 光放大器

当光波信号在光纤中传输到一定距离之后，由于光纤的传输损耗以及光学器件的插入损耗等因素的影响，使光功率随传输距离的增加而减弱。要使光波继续向前传播，就必须对光信号进行放大。早期对光信号放大的方法是光-电-光转换后放大，即将传输衰减的光信号转换

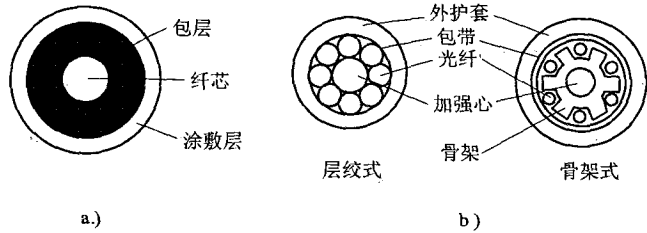


图 1-4 光纤和光缆的截面结构示意图
a) 光纤截面结构 b) 光缆截面结构

成电信号后进行放大，放大后的电信号再转换成光信号进行传输。这种方式的放大器结构复杂，成本高，同时带来很多不利因素。近几年已研究开发出的稀土掺杂的光纤放大器，克服了早期的光-电-光转换放大器的缺点。根据光纤放大器工作频段的不同，将光放大器分为四种类型：工作于 $1.55\mu\text{m}$ 波段的掺铒光纤放大器 EDFA、工作于 $1.31\mu\text{m}$ 波段的掺镨光纤放大器 (Praseodymium-Doped Fiber Amplifier, PDF A)、工作于 $1.40\mu\text{m}$ 波段的掺铥光纤放大器 (Thulium-Doped Fiber Amplifier, TDFA) 和工作于 $1.27 \sim 1.67\mu\text{m}$ 全光波段的拉曼光纤放大器 (Raman Fiber Amplifier, RFA)。对光纤放大器的基本要求是：高增益、低噪声系数、高输出功率、低非线性失真，宽而平坦的工作带宽。

5. 光接收机

光接收机同样也是光纤通信系统的核心部件，光接收机由光电探测器和放大、处理电路组成，其主要组成部分如图 1-5 所示。图中光电探测器 PD 的主要功能是检测出被信号调制的光信号，然后转换成电信号，完成光电转换功能。图 1-5 所示的光接收机的工作过程是：已调光信号经光纤传输后，到达接收端，通过光连接器进入光接收机。由光电探测器 PD 检测，转换成随信息而变化的电信号，经阻抗匹配器送入放大器放大后输出 RF 信号。

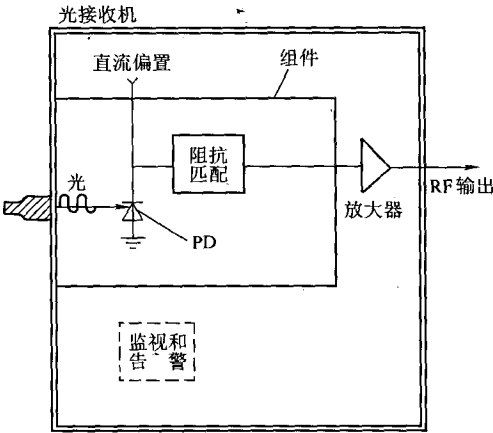


图 1-5 光接收机主要组成示意图

用在通信系统中的光电探测器主要有两种，一是 PIN 光电二极管 (PIN-PD)，另一种是雪崩光电二极管 (APD)。对光电探测器的基本要求是：灵敏度高，噪声低；响应速度快，足够的带宽；温度稳定性好，体积小，与光纤匹配，寿命长；价格合理。

在光接收机中，由光电探测器转换的电信号通常是很微弱的，必须经过放大和处理电路，将微弱的电信号放大处理后才能推动负载。

在光纤通信系统中；除了以上所述部件外，还要用到一些光无源器件，如光耦合器、光隔离器、光衰减器、光连接器、波分复用器/解复用器、光开关等，它们在光纤通信系统中