



普通高等教育“十二五”规划教材

光纤通信

张丽华 主编



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

普通高等教育“十二五”规划教材

光 纤 通 信

主 编 张丽华

副主编 彭 霞

参 编 张 倩 汪 青 戚 鹏



机械工业出版社

本书结合光纤通信技术的发展,用八章内容,全面介绍了光纤通信系统的特点、组成和应用;光纤和光缆的结构与类型;光通信用基本光器件;光端机的组成和特性;光复用技术;光纤通信系统设计;光网络以及光纤通信新技术。本书力求理论上的系统性以及技术上的新颖性和实用性;在理论分析上深入浅出,图文并茂,注重实用,适合不同层次读者的需要;在讲述中配有例题,每章后配有小结与习题。

本书可作为高校通信和电子信息类专业本科生的教材,也可作为从事光纤通信工作的科技人员的参考用书。

本书配有免费电子课件,欢迎选用本书作教材的老师登录 www.cmpedu.com 注册下载或发邮件到 xufan666@163.com 索取。

图书在版编目 (CIP) 数据

光纤通信/张丽华主编. —北京:机械工业出版社,2014.3
普通高等教育“十二五”规划教材
ISBN 978-7-111-45491-5

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 (2014) 第 008439 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:徐 凡 责任编辑:徐 凡 张利萍

版式设计:霍永明 责任校对:胡艳萍

封面设计:张 静 责任印制:刘 岚

北京京丰印刷厂印刷

2014 年 5 月第 1 版·第 1 次印刷

184mm×260mm·10.75 印张·257 千字

标准书号:ISBN 978-7-111-45491-5

定价:22.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

社服 务 中 心:(010) 88361066

销 售 一 部:(010) 68326294

销 售 二 部:(010) 88379649

读者购书热线:(010) 88379203

网络服务

教 材 网:<http://www.cmpedu.com>

机工官网:<http://www.cmpbook.com>

机工官博:<http://weibo.com/cmp1952>

封面无防伪标均为盗版

前 言

光纤通信在社会信息化发展的进程中扮演着重要的角色，是通信技术的一个重要分支。随着新型光电器件的不断出现，光纤通信技术也得到了迅速的发展，使其传输容量得到了极大提高。目前，光纤已经在很多场合取代了铜线而成为主要的传输媒介。无论电信骨干网还是以太网或校园网乃至智能建筑内的综合布线系统，无论陆地还是海洋，都有光纤的存在，都涉及光纤传输技术。对于从事信息技术的人员而言，了解光纤通信的基础知识是至关重要的。

本教材在介绍光纤通信所涉及的基本理论时，力求条理清晰、简明扼要、叙述通俗易懂。在器件的内容选择上，注重了先进性和应用性相结合。教材内容共分八章。第1章概述，介绍光纤通信系统的组成和分类、主要性能指标以及特点和应用。第2章光纤和光缆，介绍光纤的结构与分类、传输特性、光缆的结构与分类。第3章光通信基本光器件，介绍有源光器件和无源光器件，主要是光源、光检测器和光放大器等器件。第4章光端机，介绍光端机的组成、各部分的功能以及线路码型的要求和常用码型。第5章光复用技术，主要介绍多信道复用技术和波分复用技术。第6章光纤通信系统设计，简单介绍光纤通信系统的设计方法。第7章光网络，介绍SDH体系相关知识以及光传送网、接入网、智能光网络 and 全光网络的网络结构、分层和关键技术。第8章光纤通信新技术，介绍相干光通信和光孤子通信技术的基本概念、关键技术、系统功能结构与应用。

本书第1、6、7章由张丽华编写，第2章由汪青编写，第3章由戚鹏编写，第4、5章由张倩编写，第8章由彭霞编写。全书由张丽华、彭霞统稿。

由于作者水平有限，书中难免有错误或不周之处，恳请读者批评指正。

本书配有免费电子课件，欢迎选用本书作教材的老师登录 www.cmpedu.com 注册下载或发邮件到 xufan666@163.com 索取。

编 者

目 录

前言

第1章 概述 1

1.1 光纤通信的基本概念 1

1.1.1 光纤通信的特点 1

1.1.2 光纤通信使用的波段 2

1.2 光纤通信系统的组成和分类 3

1.2.1 光纤通信系统的组成 3

1.2.2 光纤通信系统的分类 3

1.3 光纤通信系统的主要性能指标 4

1.3.1 误码性能 4

1.3.2 抖动性能 5

1.4 光纤通信的应用与发展 5

1.4.1 光纤通信的应用 5

1.4.2 光纤通信的发展趋势 6

小结 7

习题 7

第2章 光纤和光缆 8

2.1 光纤的结构和分类 8

2.1.1 光纤的结构 8

2.1.2 光纤的类型 8

2.2 光纤的传光原理 10

2.2.1 光的反射和折射 10

2.2.2 光在光纤中的传播 11

2.3 光纤特性 14

2.3.1 光纤主要特征 14

2.3.2 光纤标准 15

2.3.3 光纤传输特性 17

2.4 光缆 21

2.4.1 光缆基本要求 21

2.4.2 光缆结构和类型 21

2.4.3 光缆特性和应用 25

小结 26

习题 26

第3章 光通信基本光器件 27

3.1 光源 27

3.1.1 激光器的工作原理 28

3.1.2 半导体激光器 (LD) 32

3.1.3 发光二极管 (LED) 36

3.1.4 半导体激光器与发光二极管的 比较 36

3.1.5 半导体光源的应用 37

3.2 光检测器 37

3.2.1 半导体的光电效应 38

3.2.2 PIN 光敏二极管 39

3.2.3 雪崩光敏二极管 (APD) 40

3.2.4 光检测器的特性 40

3.3 光放大器 43

3.3.1 光放大器概述 44

3.3.2 光放大器的应用 47

3.4 光纤连接器 47

3.4.1 光纤连接器的结构与种类 48

3.4.2 光纤连接器的特性 49

3.5 光耦合器 50

3.5.1 光耦合器的结构与原理 50

3.5.2 光耦合器的特性 51

3.6 波分复用/解复用器 51

3.6.1 波分复用/解复用器的原理与 分类 52

3.6.2 波分复用/解复用器的特性 53

3.7 光开关 53

3.7.1 光开关的种类 54

3.7.2 光开关的特性参数 55

3.8 光纤光栅 55

3.8.1 光纤光栅原理 55

3.8.2 光纤光栅的特性与应用 56

3.9 光隔离器及光环行器 56

3.9.1 光隔离器 56

3.9.2 光环行器 57

小结 57

习题 58

第4章 光端机 59

4.1 光发送机 59

4.1.1 光发送机的基本组成 60

4.1.2 光源的调制 61

4.1.3 光发送机的控制电路	63	7.1.6 SDH 自愈网	110
4.1.4 数字光发送机的性能指标	65	7.1.7 SDH 多业务传送平台	114
4.2 光接收机	66	7.2 WDM 光传送网	117
4.2.1 光接收机的基本组成	66	7.2.1 光传送网与通信网之间的关系	117
4.2.2 光解调原理	67	7.2.2 WDM 光传送网分层结构	117
4.2.3 光接收机的噪声特性及 误码率	67	7.2.3 WDM 网络的关键设备	118
4.2.4 光接收机的主要指标	70	7.3 光接入网 (Optical Access Network, OAN)	121
4.3 线路码型	72	7.3.1 接入网概述	121
小结	77	7.3.2 光接入网基本概念	122
习题	77	7.3.3 有源和无源光接入网	126
第 5 章 光复用技术	78	7.3.4 光纤同轴混合网 (Hybrid Fiber Coax, HFC)	134
5.1 光时分复用 (OTDM) 技术	78	7.4 智能光网络	136
5.2 光码分复用 (OCDM) 技术	79	7.4.1 智能光网络的概念	136
5.3 副载波复用 (SCM) 技术	80	7.4.2 ASON 的体系结构及接口	136
5.4 光波分复用 (WDM) 技术	81	7.4.3 ASON 的控制平面	138
小结	85	7.5 全光网络	139
习题	85	7.5.1 全光网络结构	140
第 6 章 光纤通信系统设计	86	7.5.2 全光网络的关键技术	141
6.1 概述	86	小结	144
6.2 工作波长与光器件的选择	87	习题	144
6.2.1 工作波长与光纤的选择	87	第 8 章 光纤通信新技术	146
6.2.2 光器件的选择	87	8.1 相干光通信	146
6.3 中继距离的计算	88	8.1.1 相干光通信技术基本原理	146
6.3.1 损耗受限系统	89	8.1.2 相干光通信技术的调制与 解调	148
6.3.2 色散受限系统	89	8.1.3 相干光通信关键技术	150
小结	90	8.1.4 相干光通信技术的发展	152
习题	91	8.2 光孤子通信技术	152
第 7 章 光网络	92	8.2.1 光孤子通信技术的基本原理	153
7.1 光同步数字传输网 (Synchronous Digital Hierarchy, SDH)	92	8.2.2 光孤子通信技术的发展	154
7.1.1 SDH 的基本概念	92	小结	155
7.1.2 SDH 的速率和帧结构	93	习题	156
7.1.3 SDH 复用和映射过程	98	附录 专用词汇及缩略语	157
7.1.4 SDH 设备	102	参考文献	162
7.1.5 SDH 网络结构	106		

第 1 章 概 述

1.1 光纤通信的基本概念

1.1.1 光纤通信的特点

“通信”是指信息的传送。“信息”是指用户要求传送的语音、图像、数据以及它们的各种组合。光纤通信（optical fiber communications）技术从光通信中脱颖而出，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，其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工具。

光纤通信的主要优点如下：

1. 频带宽，通信容量大

光纤可利用的带宽约为 50000GHz，1987 年投入使用的 1.7Gbit/s 光纤通信系统，一对光纤能同时传输 24192 路电话，2.4Gbit/s 系统能同时传输 30000 多路电话。

2. 损耗低，中继距离长

石英光纤在 1.31 μm 和 1.55 μm 波长的传输损耗分别为 0.50dB/km 和 0.20dB/km，甚至更低。因此，用光纤比用同轴电缆或波导管的中继距离长得多。采用外调制技术，波长为 1.55 μm 的色散移位单模光纤通信系统，若其传输速率为 2.5Gbit/s，则中继距离可达 390km；若其传输速率为 10Gbit/s，则中继距离可达 240km。

3. 抗电磁干扰性能好

光纤由电绝缘的石英材料制成，它不受自然界的雷电干扰、电离层的变化和太阳黑子活动的干扰，也不受电气化铁路馈电线和高压设备等工业电器的干扰，还可将它与高压输电线平行架设或与电力导体复合构成复合光缆。无金属光缆非常适合于存在强电磁场干扰的高压电力线路周围和油田、煤矿等易燃易爆环境中使用。

4. 无串音干扰，保密性好

光波在光缆中传输，很难从光纤中泄漏出来，即使在转弯处，弯曲半径很小时，漏出的光波也十分微弱，若在光纤的表面涂上一层消光剂效果更好，这样，即使光缆内光纤总数很多，也可实现无串音干扰，在光缆外面，也无法窃听到光纤中传输的信息。

5. 重量轻、体积小

光纤的芯径很细，约为 0.1mm，只有单管同轴电缆的百分之一；光缆的直径也很小，8 芯光缆的横截面直径约为 10mm，而标准同轴电缆为 47mm。利用光纤这一特点，使传输系统所占空间小，解决了地下管道拥挤的问题，节约了地下管道的建设成本。此外，光纤的重量轻，光缆的重量比电缆轻得多，例如 18 管同轴电缆 1m 的重量为 11kg，而同等容量的光缆 1m 重量只有 90g，这对于在飞机、宇宙飞船和人造卫星上使用光纤通信更具有重要意义。

6. 光纤的原材料资源丰富，用光纤可节约金属材料

光纤的材料主要是石英（二氧化硅），地球上取之不尽用之不竭的原材料，而电缆的主要材料是铜，世界上铜的储藏量并不多，用光纤取代电缆，则可节约大量的金属材料，具有合理使用地球资源的重大意义。

7. 容易均衡

在电通信中，信号的各频率成分的幅度变化是不相等的，频率越低，幅度的变化越小；频率越高，其幅度变化则越大。这对信号的接收极为不利，为使各频率成分都受到相同幅度的放大处理，就必须采用幅度均衡措施。而光纤通信系统则不同，在光纤通信的运用频带内，光纤对每一频率的损耗是相等的，一般情况下，不需要在中继站和接收端采取幅度均衡措施。

8. 光纤接头不放电、不产生电火花

这一优点使得光纤通信在矿井下、石油化工业、军火仓库等易燃易爆的环境中能发挥更重要的作用。

9. 抗化学腐蚀

由于光纤取材于石英，因此具有一定的抗化学腐蚀能力。

光纤的主要缺点如下：

由于光纤质地脆、机械强度低，光纤的切断和连接操作相对复杂；分路、耦合相对麻烦；弯曲半径不宜太小。这些缺点在技术上都是可以克服的，它不影响光纤通信的实用。

1.1.2 光纤通信使用的波段

光波与无线电波相似，是一种波长很短的电磁波，只是它的频率比无线电波的频率高得多。目前光纤通信的实用工作波长在近红外区，即 $0.8 \sim 2.0 \mu\text{m}$ 的波长区，属于电磁波谱中的近红外区，对应的频率为 $167 \sim 375 \text{THz}$ ，可见光纤通信所用光波的频率是非常高的。光纤对不同波长的光呈现的传输特性有很大差别，我们主要考虑光纤的衰减特性，也称为损耗特性，因为低损耗是实现光信号长距离无中继传输的前提。

目前实用通信光纤的基础材料是 SiO_2 ，对于 SiO_2 光纤，损耗包含两个方面：一是因光纤材料（石英）和结构引起的吸收、散射等造成的损耗；二是组成系统时所产生的损耗，例如接插件连接损耗、弯曲损耗等，在此仅说明光纤本身的损耗。

图 1-1 所示是一个典型的石英光纤损耗谱。由图可见，大约在 850nm 、 1310nm 和 1550nm 处有三个低损耗窗口，也称为透光窗口。第一代光纤通信系统工作在 850nm 附近，早期制造的光纤在这个区域有局部的最小损耗。通过降低光纤材料中氢氧根离子和金属离子的含量，已经可以制造在 $1100 \sim 1600 \text{nm}$ 范围内损耗极低的光纤，目前常用的工作波长在

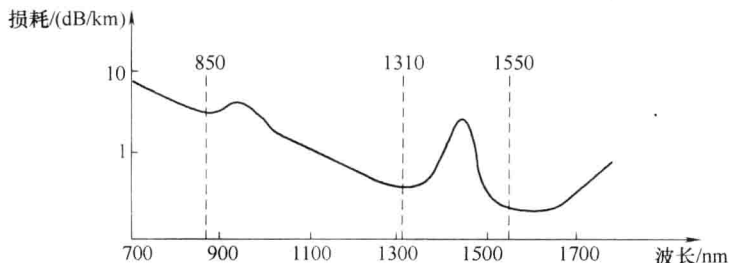


图 1-1 光纤损耗的波长特性

1310nm 和 1550nm 处。三个窗口的衰减分别为：850nm 附近为 2dB/km、1310nm 附近为 0.5dB/km、1550nm 附近为 0.2dB/km。我们把 1530 ~ 1565nm 的波长范围称为 C 波段，这是目前高速、大容量、长距离系统常用的波段。

1.2 光纤通信系统的组成和分类

1.2.1 光纤通信系统的组成

光纤通信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。图 1-2 是一个光纤通信系统组成原理示意图。

在图 1-2 的光纤通信系统中，信号的传输过程为：

1) 由电发射机输出的脉码调制信号送入光发射机，光发射机的主要作用是将电信号转换成光信号耦合进光纤。

光发射机中的重要器件是能够完成电-光转换的半导体光源，目前主要采用半导体激光器 (LD) 或半导体发光二极管 (LED)。

2) 在通信系统的线路上，目前主要采用由单模光纤制成的不同结构形式的光缆，这是由于它具有较好的传输特性。

3) 光接收机的主要作用是将光纤送过来的光信号转换成电信号，然后经过对电信号的处理，使其恢复为原来的脉码调制信号送入电接收机。光接收机中的重要部件是能够完成光-电转换任务的光电探测器，目前主要采用光敏二极管 (PIN) 和雪崩光敏二极管 (APD)。

4) 为了保证通信质量，在收、发端机之间的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。

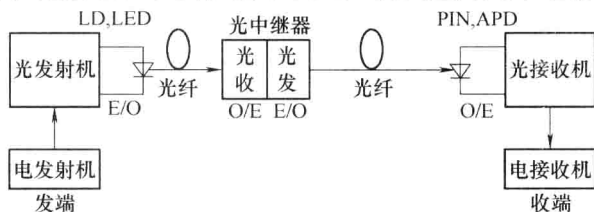


图 1-2 光纤通信系统组成原理示意图

1.2.2 光纤通信系统的分类

1. 按波长分类

短波长光纤通信系统，工作波长在 0.8 ~ 0.9 μm 范围，典型值为 0.85 μm ，这种系统的中继间距离较短，目前使用较少。

长波长光纤通信系统，工作波长在 1.0 ~ 1.6 μm 范围，通常采用 1.3 μm 和 1.5 μm 两种波长。这类系统的中继距离较长，尤其是采用 1.5 μm 零色散位移的单模光纤时，140Mbit/s 系统的中继距离可达到 100km。

超长波长光纤通信系统，采用非石英光纤，例如卤化物光纤，工作波长大于 2 μm 时，衰减为 $10^{-2} \sim 10^{-5}$ dB/km，可实现 1000km 无中继传输。

2. 按光纤的模式分类

多模光纤通信系统，采用石英多模梯度光纤作为传输线路，因传输频率受限制，一般应用于 140Mbit/s 以下的系统。

单模光纤通信系统，采用石英单模光纤作为传输线，传输容量大，距离长。目前建设的光纤通信系统都是这一类型的。

3. 按光纤的传输型号分类

光纤模拟通信系统，它是用模拟信号直接对光源进行强度调制的系统。

光纤数字通信系统，它是用 PCM 数字电信号直接对光源进行强度调制的系统，其通信距离长，传输质量高，是被广泛采用的系统。

4. 按传输速率分类

低速光纤通信系统，一般传输信号速率为 2Mbit/s 或 8Mbit/s。

高速光纤通信系统，它是传输信号速率为 34Mbit/s、140Mbit/s 以上的系统。有时把速率等于 140Mbit/s 和高于 140Mbit/s 的系统才称为高速通信系统，如 1.5Gbit/s，2.5Gbit/s 等。

5. 按应用范围分类

公用光纤通信系统，电信部门应用的光纤通信系统包括光纤市话中继通信系统、光纤长途通信系统、光纤用户环路通信系统等。

专用光纤通信系统，指电信部门以外的各部门应用的光纤通信系统，例如电力、铁路、交通、石油、广播、银行、军事等应用部门，统称为专用光纤通信系统。

1.3 光纤通信系统的主要性能指标

目前，ITU-T 已经对光纤通信系统的各个速率、各个光接口和电接口的各种性能给出具体的建议，系统的性能参数也有很多，这里主要介绍数字光纤通信系统最主要的两大质量指标：误码性能和抖动性能。

1.3.1 误码性能

所谓误码，是指经光接收机的接收与判决再生之后，码流中的某些比特发生了差错。系统的误码性能是衡量数字光纤通信系统性能优劣的一个非常重要的指标，它反映数字信息在传输过程中受到损伤的程度。

传统上常用平均误码率 BER（Bit Error Rate）来衡量系统的误码性能，即在某一规定的观测时间内（如 24h）发生差错的比特数和传输比特总数之比。但平均误码率是一个长期效应，它只给出一个平均累积结果，不能反映系统是否有突发性、成群的误码存在。而实际上误码的出现往往呈突发性，且具有极大的随机性，因此除了平均误码率之外还应该有一些短期度量误码的参数，根据国际电信联盟电信标准部（ITU—T）的 G·821 建议，衡量系统误码特性优劣的具体指标分为三类：①劣化分（钟）；②误码秒；③严重误码秒。它们在 27500km 的假设参考数字连接情况下的定义和具体指标列于表 1-1 中。

表 1-1 三种误码类别的定义和相应的指标

误 码 类 别	定 义	指 标
劣化分(DM)	1min 时间内误码率劣于 1×10^{-6} 的时间,扣除“不可用”时间和严重误码秒后总劣化与总评价时间之比	小于 10%
误码秒(ES)	有误码的秒与总评价时间之比	小于 8%
严重误码秒(SES)	1s 时间内误码率劣于 1×10^{-3} 的总严重误码秒与总评价时间之比	小于 0.2%

必须指出,在表 1-1 中,总的评价时间虽未明确规定,但一般应越长越好,而“不可用”时间则定义为连续 10s (或以上) 误码率大于 10^{-3} 的时间 (也称为故障时间)。

1.3.2 抖动性能

抖动是指数字脉冲信号的特定时刻 (如最佳判决时刻) 相对于其理想时间位置的短期的、非积累性的偏离。所以抖动又叫抖动时间。通常认为,当前后变化的频率大于 10Hz 时,这种现象就是一种抖动,如图 1-3 所示。

抖动会对传输质量甚至整个系统的性能产生恶劣影响,如会使信号发生失真,使系统的误码率上升以及会产生或丢失比特导致帧失步等。

产生抖动的机理是比较复杂的,主要原因有:

1) 由于噪声引起的抖动。

2) 时钟恢复电路产生的抖动。

3) 其他原因引起的抖动。引起抖动还有其他原因,如数字系统的复接、分接过程,光缆的老化等。

抖动的单位是 UI (Unit Interval), 即偏差和码元周期之比。如偏差为 0.5ns, 码元周期为 7.18ns, 则抖动为 $0.5/7.18 = 0.07\text{UI}$ 。

由于抖动难以完全消除,为保证整个系统正常工作,根据 ITU-T 建议和我国国标,抖动的性能参数主要有:

1) 输入抖动容限,是指加在输入信号上能使设备产生 1dB 光功率代价的抖动值。

2) 输出抖动,是指在无输入抖动的条件下设备的输出抖动值。

3) 抖动传递特性 (仅用于中继器),是指在不同的测试频率下,输入信号的抖动值与输出信号抖动值之比的分布特性。

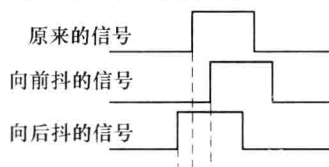


图 1-3 数字脉冲信号的抖动

1.4 光纤通信的应用与发展

1.4.1 光纤通信的应用

光纤可以传输数字信号,也可以传输模拟信号。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) 等。

(2) 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

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。

我国 1973 年开始研究光纤通信,主要集中在石英光纤、半导体激光器和编码制式通信机等方面。

1978 年改革开放后,我国的光纤通信研发工作大大加快。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,要求一切产品是商用产品而不是试验品,要符合国际 CCITT 标准,要由设计院设计、工人施工,而不是科技人员施工。从此中国的光纤通信进入实用阶段。

进入 20 世纪 80 年代后,数字光纤通信的速率已达到 144Mbit/s,可传送 1980 路电话。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,我国已建成“八纵八横”干线网,连通全国各省区市,敷设光缆总长约为 250 万 km,光纤通信已成为中国通信的主要手段。

2005 年 3.2Tbit/s 超大容量的光纤通信系统在上海至杭州开通,是世界上容量最大的实用线路。

1.4.2 光纤通信的发展趋势

1. 向超长距离传输发展

各种通信技术的快速发展使上千甚至上万公里的长距离传输成为可能。无中继传输是骨干传输网的期望,目前已能够实现 2000~5000km 的无电中继传输。通过采用如拉曼光放大技术等新的技术手段,有望更进一步延长光传输的距离。

2. 向超高速系统发展

高比特率系统的经济效益大致按指数规律增长,这促使光纤通信系统的传输速率在近 30 年来一直持续增加,单路速率不断提升,已达到 10Gbit/s、20Gbit/s、40Gbit/s,采用 OTDM 技术甚至可达 640Gbit/s,比同期微电子技术的集成度增加速度还快得多。高速系统的出现不仅增加了业务传输容量,而且也为各种各样的新业务,特别是宽带业务和多媒体业务提供了可靠的保证。

3. 向超大容量波分复用(WDM)系统发展

如果将多个发送波长、适当错开的光源信号同时在光纤上传送,则可大大增加光纤的信息传输容量,这就是波分复用(WDM)的基本思路。采用波分复用系统可以充分利用光纤的巨大带宽资源,使容量可以迅速扩大几倍、甚至上百倍;在大容量长途传输时可以节约大量光纤和再生器,从而大大降低了传输成本;利用 WDM 网络实现网络交换和恢复,可望实现未来透明的、具有高度生存性的光联网。

其他方面,如光纤入户(FTTH)技术、光交换技术、新的光电器件、光孤子技术等,都是当前光纤通信方面的重点发展方向。

4. 全光网

全光网成为目前光通信领域最热门的话题之一。为了进一步提高通信速度,将发展光电

混合集成电路，提高光电转换的速度，增强现有光系统的传输能力。这方面远期的发展目标是光学集成的全光线路，使更多的信号处理功能在光频上完成。

另外，为了大大提高光纤通信系统的有效性和可靠性，许多国家还在进行光放大器、相干光通信、多波道光纤通信及光孤子通信等新技术的研究。

总之，全光网络是未来信息传送网的发展方向，它可以直接对光信号进行处理，不仅大大简化了网络结构、降低了成本，而且极大地提高了网络的稳定性与可靠性。

小 结

本章简要地介绍了光纤通信产生的技术背景和发展历程以及我国光纤通信的发展成果，概括了光纤通信的特点和应用，介绍了光纤通信系统的组成、分类、发展趋势以及涉及的主要性能指标。

习 题

1. 什么是光纤通信系统？简述光纤通信的发展。
2. 光纤通信主要有哪些优点？
3. 为什么说光纤通信比电缆通信的容量大？
4. 光纤通信的组成主要包括哪些部分？简述各部分的主要功能。

第2章 光纤和光缆

2.1 光纤的结构和分类

2.1.1 光纤的结构

光纤（Optical Fiber）是光导纤维的简称，呈圆柱形，由纤芯、包层与涂覆层三大部分组成，如图 2-1 所示。其中包层和纤芯合起来称为裸光纤，光纤的光学特性及其传输特性主要由它决定。通信用的光纤纤芯（直径为 $9 \sim 50\mu\text{m}$ ），成分通常是折射率为 n_1 的高纯度 SiO_2 ，并掺有极少量的掺杂剂（如 GeO_2 等），以提高折射率。包层（直径约为 $125\mu\text{m}$ ）成分是折射率为 n_2 （ $< n_1$ ）的高纯度 SiO_2 ，并掺有极少量的掺杂剂（如 B_2O_3 等），以降低折射率。涂覆层（直径约为 1.5cm ）的材料通常是环氧树脂、硅橡胶和尼龙，其作用是增强光纤的机械强度与可弯曲形。

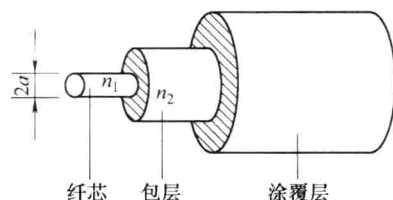


图 2-1 光纤结构

2.1.2 光纤的类型

光纤种类很多，这里只讨论作为信息传输波导用的由高纯度石英（ SiO_2 ）制成的光纤。

实用光纤主要有三种基本类型：单模光纤、突变型多模光纤、渐变型多模光纤，如图 2-2 所示。

1. 单模光纤

如图 2-2c 所示，折射率分布和突变型光纤相似，纤芯直径只有 $8 \sim 10\mu\text{m}$ ，光线以直线形状沿纤芯中心轴线方向传播。因为这种光纤只能传输一个模式（由两个偏振态简并而成），所以称为单模光纤，其信号畸变很小。

2. 突变型多模光纤

如图 2-2a 所示，纤芯折射率为 n_1 保持不变，到包层突然变为 n_2 ，故又称为阶跃折射率光纤。这种光纤一般纤芯直径 $2a = 50 \sim 80\mu\text{m}$ ，光线以折线形状沿纤芯中心轴线方向传播，特点是信号畸变大。

3. 渐变型多模光纤

如图 2-2b 所示，在纤芯中心折射率最大为 n_1 ，沿径向 r 向外围逐渐变小，直到包层变为 n_2 。这种光纤一般纤芯直径 $2a$ 为 $50\mu\text{m}$ ，光线以正弦形状沿纤芯中心轴线方向传播，特点是信号畸变小。

4. 特种光纤

相对于单模光纤而言，突变型光纤和渐变型光纤的纤芯直径都很大，可以容纳数百个模

式。渐变型多模光纤和单模光纤，包层外径 $2b$ 都选用 $125\mu\text{m}$ 。实际上，为调整工作波长或改善色散特性，可以在图 2-2c 常规单模光纤的基础上，设计许多结构复杂的特种单模光纤。最有用的若干典型特种单模光纤的横截面结构和折射率分布如图 2-3 所示，这些光纤的特征如下。

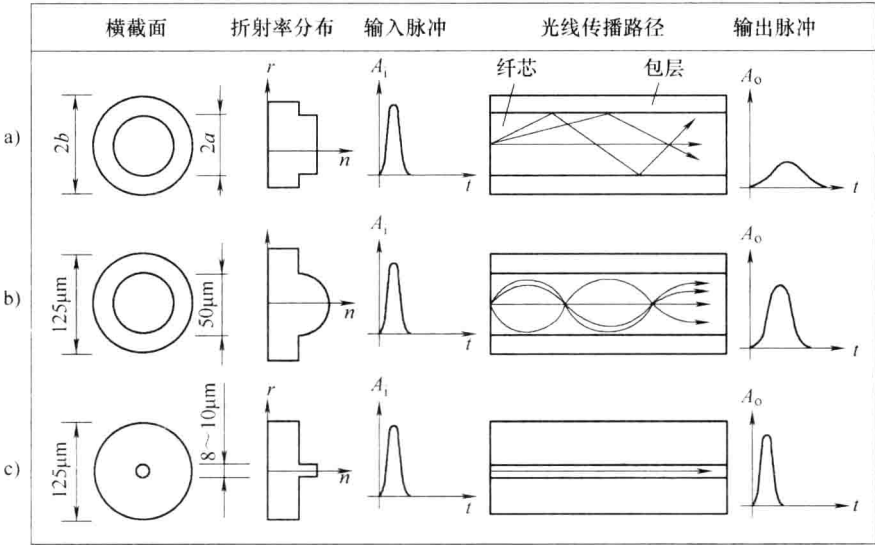


图 2-2 三种基本类型的光纤
a) 突变型多模光纤 b) 渐变型多模光纤 c) 单模光纤

(1) 双包层光纤

如图 2-3a 所示，折射率分布像 W 形，又称为 W 形光纤。这种光纤有两个包层，内包层外直径 $2a'$ 与纤芯直径 $2a$ 的比值 $a'/a \leq 2$ 。适当选取纤芯、外包层和内包层的折射率 n_1 、 n_2 和 n_3 ，调整 a 值，可以得到在 $1.3 \sim 1.6\mu\text{m}$ 之间色散变化很小的色散平坦光纤（Dispersion Flattened Fiber, DFF），或把零色散波长移到 $1.55\mu\text{m}$ 的色散移位光纤（Dispersion Shifted Fiber, DSF）。

(2) 三角芯光纤

如图 2-3b 所示，纤芯折射率分布呈三角形，这是一种改进的色散移位光纤。这种光纤在 $1.55\mu\text{m}$ 有微量色散，有效面积较大，适合于密集波分复用和孤子传输的长距离系统使用，康宁公司称它为长距离系统光纤，这是一种非零色散光纤。

(3) 椭圆芯光纤

如图 2-3c 所示，纤芯折射率分布呈椭圆形。这种光纤具有双折射特性，即两个正交偏振模的传输常数不同。强双折射特性能使传输光保持其偏振状态，因而又称为双折射光纤或偏振保持光纤。

以上各种特征不同的光纤，其用途也不同。突变型多模光纤信号畸变大，相应的带宽距离积只有 $10 \sim 20\text{MHz} \cdot \text{km}$ ，只能用于小容量（ 8Mbit/s 以下）短距离（几千米以内）系统。渐变型多模光纤的带宽距离积可达 $1 \sim 2\text{GHz} \cdot \text{km}$ ，适用于中等容量（ $34 \sim 140\text{Mbit/s}$ ）中等距离（ $10 \sim 20\text{km}$ ）系统。大容量（ $622\text{Mbit/s} \sim 2.5\text{Gbit/s}$ ）长距离（ 30km 以上）系统要用单模光纤。

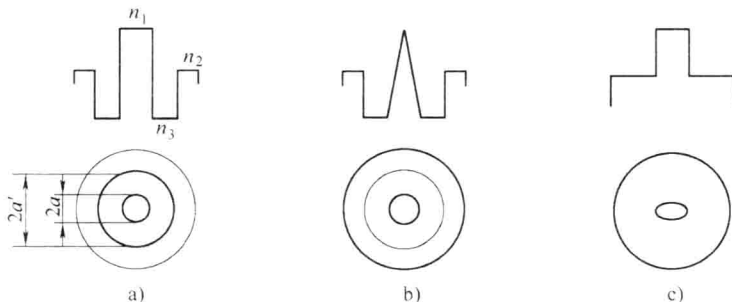


图 2-3 典型特种单模光纤

a) 双包层 b) 三角芯 c) 椭圆芯

特种单模光纤能大幅度提高光纤通信系统的水平。1.55 μm 色散移位光纤实现了 10Gbit/s 容量的 100km 的超大容量超长距离系统。色散平坦光纤适用于波分复用系统, 这种系统可以把传输容量提高几倍到几十倍。三角芯光纤有效面积较大, 有利于提高输入光纤的光功率, 增加传输距离。外差接收方式的相干光系统要用偏振保持光纤, 这种系统的最大优点是提高接收灵敏度, 增加传输距离。

2.2 光纤的传光原理

2.2.1 光的反射和折射

光在真空中的速度 $c = 2.9979 \times 10^8 \text{ m/s}$, 空气中为 $c_0 = 2.997 \times 10^8 \text{ m/s}$, 在其他媒质中的速度为

$$v = c/n \quad (2-1)$$

式中, n 为折射率。如 $n_{\text{水}} = 1.33$, $n_{\text{玻璃}} = 1.5$ 。 n 数值大为光密媒质, n 数值小为光疏媒质, 并且 n 还与光的波长有关。或者说, 不同波长的光在同一媒质中的传输速度有差异。如玻璃对红光(波长较大)的折射率比对紫光(波长较小)的折射率小。光波属于电磁波范畴, 在均匀媒质中传播时, 其轨迹是一条直线, 可称为光射线。当光射线射到两媒质(介质)交界面时, 将发生反射和折射, 如图 2-4 所示。

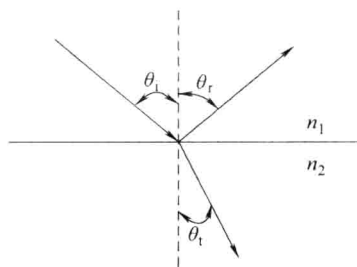


图 2-4 光的反射与折射

设入射角为 θ_i , 反射角为 θ_r , 折射角为 θ_t , 则

$$\theta_i = \theta_r \quad (\text{反射定理}) \quad (2-2)$$

$$n_1 \sin \theta_i = n_2 \sin \theta_t \quad (\text{折射定理}) \quad (2-3)$$

若光从光密媒质向光疏媒质入射, 则

$$\theta_t > \theta_i$$

若光从光疏媒质向光密媒质入射, 则

$$\theta_t < \theta_i$$

当光线由光密媒质（如 n_1 ）射向光疏媒质（如 n_2 ）时，由于 $n_1 > n_2$ ，则此时光疏媒质中的折射线将离开法线而折射， $\theta_t > \theta_i$ 。

当入射角增加到某一值时，可使得折射角 $\theta_t = 90^\circ$ ，这时折射线将沿界面传输，此时入射角称为临界角，用 θ_c 表示。

根据折射定理

$$n_1 \sin \theta_i = n_2 \sin \theta_t$$

当 $\theta_i > \theta_c$ 时，折射角 θ_t 必大于 90° ，光射线不再进入媒质 II，而由界面全部反射回媒质 I，这种现象称为全反射。

2.2.2 光在光纤中的传播

研究光在光纤中的传播，我们关注的问题主要是光束在光纤中传播的空间分布和时间分布，并由此得到数值孔径和时间延迟的概念。

1. 突变型多模光纤

下面以突变型多模光纤的交轴（子午）光线为例，进一步讨论光纤的传输条件。设纤芯和包层折射率分别为 n_1 和 n_2 ，空气的折射率 $n_0 = 1$ ，纤芯中心轴线与 z 轴一致，如图 2-5 所示。光线在光纤端面以小角度 θ 从空气入射到纤芯（ $n_0 < n_1$ ），折射角为 θ_1 ，折射后的光线在纤芯直线传播，并在纤芯与包层界面以角度 ψ_1 入射到包层（ $n_1 > n_2$ ）。改变入射角 θ 的大小，会使光线在纤芯与包层界面发生反射或折射。根据全反射原理，存在一个临界角 θ_c ，当 $\theta < \theta_c$ 时，相应的光线将在界面发生全反射而返回纤芯，并以折线的形状向前传播，如光线 1。根据斯奈尔（Snell）定律得到

$$n_0 \sin \theta = n_1 \sin \theta_1 = n_1 \cos \psi_1 \quad (2-4)$$

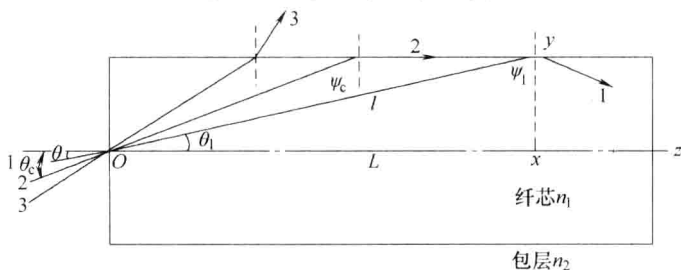


图 2-5 突变型多模光纤的光线传播原理

当 $\theta = \theta_c$ 时，相应的光线将以 ψ_c 入射到界面，并沿界面向前传播（折射角为 90° ），如光线 2，当 $\theta > \theta_c$ 时，相应的光线将在界面折射进入包层并逐渐消失，如光线 3。由此可见，只有在半锥角为 $\theta \leq \theta_c$ 的圆锥内入射的光束才能在光纤中传播。根据这个传播条件，定义临界角 θ_c 的正弦为数值孔径（Numerical Aperture, NA）。根据定义和斯奈尔定律得

$$NA = n_0 \sin \theta_c = n_1 \cos \psi_c, \quad n_1 \sin \psi_c = n_2 \sin 90^\circ \quad (2-5)$$

$n_0 = 1$ ，由式（2-5）经简单计算得到

$$NA = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \approx n_1 \sqrt{2\Delta} \quad (2-6)$$

式中， $\Delta = (n_1 - n_2)/n_1$ 为纤芯与包层相对折射率差。设 $\Delta = 0.01$ ， $n_1 = 1.5$ ，得到 $NA = 0.21$