

● 光通信系列丛书

# 光纤通信网络

原 荣 主编



電子工業出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY  
URL: <http://www.phei.com.cn>

7345  
425

光通信系列丛书

# 光 纤 通 信 网 络

原 荣 主编

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 • BEIJING

## 内 容 简 介

0007/54

本书全面介绍了光纤通信网络技术,共十八章。前8章介绍组成网络的各个部件和技术,如光纤光缆及其耦合连接、探测器和接收机、光源和发射机以及调制、复用和解复用技术,对最近发展成熟的掺铒光纤放大器(EDFA)和光孤子通信技术也作了阐述。后10章回顾了光纤通信网络的发展历史,简要地介绍了光纤以太网、令牌环、FDDI,较全面系统地介绍了CATV、SDH通信网、网络的拓扑结构、多路复用、交换技术以及海底光缆通信技术。本书选取了光纤通信系统和网络技术的最新素材,反映了当前光纤通信网络技术的发展水平,其特点是内容广泛,注重实用,并采用最新的国际标准。

本书可供从事光纤通信系统和网络研究、教学、规划、设计、使用、管理和维护的有关人员,以及学习光纤通信课程的学生参考。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,翻版必究。

丛 书 名: 光通信系列丛书

书 名: 光纤通信网络

主 编: 原 荣

责任编辑 史明生

排版制作: 电子工业出版社计算机排版室

印 刷 者: 北京兴华印刷厂

装 订 者: 三河双峰装订厂

出版发行: 电子工业出版社 URL:<http://www.phei.com.cn>

北京市海淀区万寿路173信箱 邮编 100036

经 销: 各地新华书店

开 本: 787×1092 1/16 印张: 34.25 字数: 852.8千字

版 次: 1999年2月第1版 1999年2月第1次印刷

书 号: ISBN 7-5053-4788-8  
TP•2324

定 价: 55.00 元

凡购买电子工业出版社的图书,如有缺页、倒页、脱页、所附磁盘或光盘有问题者,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系调换。电话: 68279077

## 前 言

光导纤维是现代通信网络中传输信息的最佳媒质。光纤通信是信息社会的支柱,是“信息高速公路”的骨干网,也是世界通信建设今后发展的主体。光纤通信作为一种新兴的通信技术,从一开始就显示出无比的优越性,引起人们的极大兴趣和关注。在短短的二十几年中,获得了迅速的发展,光纤通信新技术不断涌现,面貌日新月异。

参与编写本书的作者多年来从事光纤通信技术研究,为了跟踪世界光纤通信技术的发展,全面介绍光纤通信技术及光纤网络的最新成果,满足广大科学研究人员、工程技术人员和高等院校师生的需求,编写了本书,介绍给感兴趣的读者。

本书共18章。前8章介绍光纤通信的基础知识,包括光纤光缆、无源器件、光发射和接收、调制和编码、相干检测,以及最新发展起来的光纤放大器和光孤子通信。第九章~第十八章介绍光纤通信网络知识,包括以太网、令牌环、光纤电视分配系统(CATV)和光纤接入网、光纤分布式数据接口(FDDI)和光同步传输网(SDH),以及可以充分挖掘光纤带宽的多路复用技术,如密集波分复用(WDM)和光时分复用(OTDM)。本书对电路交换、分组交换及具有广阔发展前景的集复用、传输和交换为一体的异步传送模式(ATM)也作了阐述。此外,对网络的拓扑结构,特别是第三代光纤通信网络的拓扑结构,光交换,以及海底光缆通信网络技术也进行了介绍。掺铒光纤放大器、波分复用技术已经用于海底光缆通信系统,可以说海底光缆通信网络是最能体现光纤通信最新技术的应用领域。

本书的特点是:从系统应用和集成的观点选取素材组织编写,尽量避免冗长的公式推导,一般只给出其结果;文字叙述力求通俗易懂,简明扼要;另外,为了读者进一步了解书中的有关内容,每章之后均列出较详细的参考文献。

参与本书编写的有原荣、周洋溢和李焰。周洋溢负责编写第一章和第二章,李焰负责编写第十六章,其余的由原荣编写,全书由原荣统编。

张祥冰也参与了第一章和第十四章部分内容的编写,并为本书的文字、部分图片的计算机录入和文字校对等做了大量的工作,付出了辛勤的劳动,在此作者表示衷心的感谢。

由于光纤通信技术的发展十分迅速,加之编写时间有限,书中不足及错误之处,敬请专家和读者批评指正。

编 者

1998年春

## 目 录

|                     |           |
|---------------------|-----------|
| <b>第一章 光纤和光缆</b>    | <b>1</b>  |
| 1.1 光纤结构和类型         | 1         |
| 1.1.1 多模光纤          | 2         |
| 1.1.2 单模光纤          | 2         |
| 1.2 光纤传输原理          | 2         |
| 1.2.1 传输条件          | 2         |
| 1.2.2 光纤模式          | 3         |
| 1.3 光纤传输特性          | 6         |
| 1.3.1 带宽和色散         | 6         |
| 1.3.2 衰减            | 10        |
| 1.3.3 非线性光学效应       | 12        |
| 1.4 光纤的选择           | 14        |
| 1.4.1 选择的一般原则       | 14        |
| 1.4.2 单模光纤的进展和应用    | 16        |
| 1.5 光缆              | 17        |
| 1.5.1 对光缆的基本要求      | 17        |
| 1.5.2 光缆结构和类型       | 19        |
| 1.5.3 海底光缆          | 21        |
| 主要参考文献              | 25        |
| <b>第二章 光无源器件</b>    | <b>26</b> |
| 2.1 连接器             | 26        |
| 2.1.1 连接损耗          | 26        |
| 2.1.2 结构和特性         | 30        |
| 2.2 接头              | 32        |
| 2.2.1 永久性连接方法       | 32        |
| 2.2.2 连接方法的比较       | 33        |
| 2.3 耦合器             | 34        |
| 2.3.1 耦合器类型和结构      | 34        |
| 2.3.2 耦合器特性         | 38        |
| 2.4 可调谐光滤波器         | 39        |
| 2.5 调制器             | 43        |
| 2.6 隔离器             | 47        |
| 2.7 光开关             | 49        |
| 2.7.1 机械光开关         | 49        |
| 2.7.2 固体光开关         | 49        |
| 2.8 光环行器            | 51        |
| 2.9 光纤光栅            | 52        |
| 2.9.1 光纤光栅的种类及其光学特性 | 53        |
| 2.9.2 光纤光栅在光纤通信中的应用 | 53        |
| 主要参考文献              | 55        |

|                              |               |
|------------------------------|---------------|
| <b>第三章 光源和光发射机</b>           | <b>57</b>     |
| 3.1 概述                       | 57            |
| 3.2 发光机理                     | 58            |
| 3.2.1 发光机理                   | 58            |
| 3.2.2 光增益                    | 60            |
| 3.2.3 器件结构                   | 62            |
| 3.2.4 量子限制激光器                | 63            |
| 3.3 多模半导体激光器                 | 63            |
| 3.3.1 激光器起振的相位条件             | 64            |
| 3.3.2 激光器起振的阈值条件             | 64            |
| 3.4 单频激光器                    | 65            |
| 3.5 波长可调谐半导体激光器              | 66            |
| 3.6 半导体激光器的特性                | 70            |
| 3.6.1 半导体激光器的基本特性            | 70            |
| 3.6.2 模式特性                   | 75            |
| 3.6.3 调制响应                   | 75            |
| 3.6.4 半导体激光器噪声               | 79            |
| 3.7 光发射机设计                   | 81            |
| 3.7.1 驱动电路                   | 81            |
| 3.7.2 可靠性                    | 83            |
| 3.8 光频稳定及其控制                 | 84            |
| 3.9 对激光器的保护                  | 86            |
| 3.9.1 光源慢起动保护                | 86            |
| 3.9.2 激光器过流保护                | 87            |
| 3.9.3 反向冲击电流保护               | 87            |
| 3.9.4 焊接和静电保护                | 87            |
| 3.10 光纤激光器                   | 88            |
| 3.10.1 掺铒光纤激光器               | 88            |
| 3.10.2 光纤光栅分布反馈式(DFB)激光器     | 89            |
| 主要参考文献                       | 89            |
| <br><b>第四章 调制、编码和复用</b>      | <br><b>92</b> |
| 4.1 定义                       | 92            |
| 4.2 载波调制                     | 93            |
| 4.2.1 模拟载波调制传输               | 94            |
| 4.2.2 数字载波调制传输               | 96            |
| 4.3 脉冲编码调制                   | 98            |
| 4.3.1 线性编码 PCM               | 102           |
| 4.3.2 压缩和扩张                  | 103           |
| 4.3.3 差分 PCM(DPCM) 和增量调制(DM) | 103           |
| 4.4 频分复用                     | 103           |
| 4.4.1 工作原理                   | 104           |
| 4.4.2 FDM 对传输带宽的要求           | 105           |
| 4.4.3 FDM 系统功率代价             | 106           |
| 4.4.4 互调产物(IMP)              | 107           |
| 4.4.5 载频间距                   | 109           |
| 4.5 时分复用(TDM)通信              | 111           |
| 4.5.1 时分复用工作原理               | 111           |
| 4.5.2 时分复用传输帧效率              | 113           |

|                           |     |
|---------------------------|-----|
| 4.5.3 TDM 应用 .....        | 114 |
| 4.6 光载波调制 .....           | 114 |
| 4.6.1 模拟强度调制(AM/ID) ..... | 114 |
| 4.6.2 数字强度调制 .....        | 115 |
| 主要参考文献 .....              | 116 |

## 第五章 光探测及光接收机..... 117

|                        |     |
|------------------------|-----|
| 5.1 一般概念 .....         | 117 |
| 5.2 光电二极管 .....        | 118 |
| 5.2.1 PIN 光电二极管 .....  | 118 |
| 5.2.2 雪崩光电二极管 .....    | 119 |
| 5.2.3 响应带宽 .....       | 120 |
| 5.2.4 新型 APD 结构 .....  | 120 |
| 5.3 光接收机 .....         | 122 |
| 5.3.1 前置放大器 .....      | 122 |
| 5.3.2 线性通道 .....       | 123 |
| 5.3.3 数据恢复 .....       | 125 |
| 5.4 接收机噪声 .....        | 126 |
| 5.4.1 噪声机理 .....       | 126 |
| 5.4.2 PIN 接收机 .....    | 126 |
| 5.4.3 APD 接收机 .....    | 127 |
| 5.5 接收机灵敏度 .....       | 129 |
| 5.5.1 比特误码率 .....      | 129 |
| 5.5.2 最小平均接收光功率 .....  | 132 |
| 5.5.3 光电探测器的量子限制 ..... | 134 |
| 5.6 灵敏度下降机理 .....      | 135 |
| 5.7 光接收机的性能 .....      | 137 |
| 主要参考文献 .....           | 138 |

## 第六章 相干检测..... 139

|                                 |     |
|---------------------------------|-----|
| 6.1 基本概念 .....                  | 139 |
| 6.1.1 本地振荡器 .....               | 139 |
| 6.1.2 零差检测 .....                | 140 |
| 6.1.3 外差检测 .....                | 141 |
| 6.1.4 信噪比(SNR) .....            | 141 |
| 6.2 光调制方式 .....                 | 142 |
| 6.2.1 幅移键控调制(ASK) .....         | 143 |
| 6.2.2 相移键控(PSK)调制 .....         | 143 |
| 6.2.3 频移键控(FSK)调制 .....         | 144 |
| 6.3 解调方式 .....                  | 145 |
| 6.3.1 外差同步解调 .....              | 145 |
| 6.3.2 外差异步解调 .....              | 146 |
| 6.4 比特误码率和接收机灵敏度 .....          | 147 |
| 6.4.1 同步解调接收机比特误码率和接收机灵敏度 ..... | 147 |
| 6.4.2 异步解调接收机比特误码率和接收机灵敏度 ..... | 150 |
| 6.5 灵敏度下降机理和系统设计 .....          | 151 |
| 6.5.1 相位噪声和相位分集接收 .....         | 151 |
| 6.5.2 强度噪声和平衡混频接收 .....         | 153 |

|            |                        |            |
|------------|------------------------|------------|
| 6.5.3      | 极化匹配和极化控制              | 154        |
| 6.5.4      | 实用分集组合接收机              | 156        |
| 6.5.5      | 光纤色散                   | 157        |
| 6.6        | 系统性能                   | 158        |
| 6.6.1      | 异步解调外差系统               | 158        |
| 6.6.2      | 外差同步解调系统               | 159        |
| 6.6.3      | 零差系统                   | 160        |
| 6.6.4      | 野外试验                   | 160        |
|            | 主要参考文献                 | 162        |
| <b>第七章</b> | <b>光放大器</b>            | <b>164</b> |
| 7.1        | 一般概念                   | 164        |
| 7.1.1      | 增益频谱和带宽                | 165        |
| 7.1.2      | 增益饱和                   | 166        |
| 7.1.3      | 放大器噪声                  | 167        |
| 7.1.4      | 光放大器应用                 | 168        |
| 7.2        | 半导体激光放大器               | 168        |
| 7.2.1      | 放大器设计                  | 169        |
| 7.2.2      | 放大器特性                  | 170        |
| 7.2.3      | 多信道应用                  | 172        |
| 7.3        | 光纤喇曼放大器                | 174        |
| 7.4        | 光纤布里渊放大器               | 175        |
| 7.5        | 掺铒光纤放大器                | 177        |
| 7.5.1      | 掺铒光纤结构                 | 177        |
| 7.5.2      | 光纤放大器的工作原理及其特性         | 179        |
| 7.5.3      | 掺铒光纤放大器的优点             | 183        |
| 7.5.4      | EDFA 的应用               | 184        |
| 7.5.5      | 掺铒光纤放大器的增益和噪声测量        | 187        |
| 7.5.6      | 实用光纤放大器的构成及其技术指标       | 191        |
| 7.5.7      | EDFA 在级联中可能出现的问题及其解决办法 | 193        |
| 7.6        | 光放大器设计和性能问题            | 194        |
| 7.6.1      | 直接检测光放大系统              | 194        |
| 7.6.2      | 相干光放大系统                | 197        |
| 7.6.3      | 级联在线放大器系统              | 198        |
|            | 主要参考文献                 | 200        |
| <b>第八章</b> | <b>光孤子通信系统</b>         | <b>203</b> |
| 8.1        | 前言                     | 203        |
| 8.2        | 光纤孤子及其特性               | 203        |
| 8.2.1      | 非线性薛定谔方程(NSE)          | 203        |
| 8.2.2      | 一阶和高阶孤子                | 204        |
| 8.2.3      | 暗孤子                    | 207        |
| 8.3        | 光纤损耗对光孤子传输的影响及其对策      | 207        |
| 8.3.1      | 损耗引入光孤子展宽              | 207        |
| 8.3.2      | 通过对光孤子放大补偿光纤损耗         | 209        |
| 8.4        | 光孤子放大实验                | 209        |
| 8.5        | 光孤子通信系统设计              | 210        |
| 8.5.1      | 光孤子交互作用                | 211        |

|            |                   |            |
|------------|-------------------|------------|
| 8.5.2      | 线性频率调制(啁啾)        | 213        |
| 8.5.3      | 光孤子通信系统的无中继距离     | 215        |
| 8.5.4      | 放大器噪声引起的孤子时间抖动    | 217        |
| 8.5.5      | 高阶效应对光孤子传输的影响     | 218        |
| 8.6        | 光孤子通信实验系统         | 220        |
| 8.6.1      | 光孤子通信系统的组成        | 220        |
| 8.6.2      | 光孤子源              | 221        |
| 8.6.3      | 光孤子的测量            | 222        |
| 8.6.4      | 光孤子的编码和调制         | 224        |
| 8.6.5      | 光孤子通信实验系统         | 225        |
| 8.6.6      | 多信道光孤子通信系统        | 226        |
| 8.7        | 结论                | 228        |
|            | 主要参考文献            | 228        |
| <b>第九章</b> | <b>光纤通信网络概述</b>   | <b>231</b> |
| 9.1        | 光纤通信网络技术发展过程      | 231        |
| 9.1.1      | 光纤通信史回顾           | 231        |
| 9.1.2      | 电缆网络的缺点           | 232        |
| 9.1.3      | 三种基本的光纤通信系统       | 233        |
| 9.1.4      | 三代通信网络介绍          | 234        |
| 9.1.5      | 全光网络—第三代网络介绍      | 236        |
| 9.1.6      | 光纤网络容量            | 238        |
| 9.2        | 网络性能参数及千兆比特网络的应用  | 239        |
| 9.2.1      | 网络性能参数            | 239        |
| 9.2.2      | 对三种基本通信系统要求的差异    | 241        |
| 9.2.3      | 千兆比特网络的出现及其应用     | 242        |
| 9.3        | 光纤通信网络分类          | 244        |
| 9.3.1      | 按主要性能分类           | 244        |
| 9.3.2      | 按技术特征分类           | 246        |
| 9.3.3      | 按技术体制分类           | 246        |
|            | 主要参考文献            | 247        |
| <b>第十章</b> | <b>光纤通信网络拓扑结构</b> | <b>248</b> |
| 10.1       | 方向耦合器             | 248        |
| 10.2       | 总线形拓扑结构           | 250        |
| 10.2.1     | 无源线形总线            | 251        |
| 10.2.2     | 有源线性总线            | 257        |
| 10.3       | 环形拓扑结构            | 260        |
| 10.4       | 星形拓扑结构            | 264        |
| 10.4.1     | 传输型星形耦合器网络        | 264        |
| 10.4.2     | 反射型星形耦合器          | 265        |
| 10.4.3     | 分布星形网络            | 266        |
| 10.4.4     | 有源 265 星形网络       | 267        |
| 10.5       | 多光纤系统             | 270        |
| 10.6       | 树形拓扑结构            | 271        |
| 10.7       | 多跳光网络拓扑结构         | 272        |
| 10.7.1     | 单跳光网络             | 272        |
| 10.7.2     | 多跳光网络             | 272        |

|                                   |            |
|-----------------------------------|------------|
| 10.8 复合网络 .....                   | 277        |
| 10.8.1 星形/总线拓扑结构 .....            | 2747       |
| 10.8.2 星形/树形拓扑结构 .....            | 277        |
| 10.8.3 环形/星形/总线拓扑结构 .....         | 278        |
| 10.8.4 星形/总线/星形拓扑结构 .....         | 279        |
| 主要参考文献 .....                      | 279        |
| <b>第十一章 光纤局域网(LAN) .....</b>      | <b>280</b> |
| 11.1 LAN 简介 .....                 | 280        |
| 11.2 光纤局域网发展简史 .....              | 282        |
| 11.3 光纤局域网标准体系 .....              | 283        |
| 11.4 LAN 的应用 .....                | 288        |
| 11.5 器件损耗对光纤局域网的限制 .....          | 289        |
| 11.5.1 器件损耗对无源光纤总线和环形拓扑的限制 .....  | 289        |
| 11.5.2 器件损耗对无源星形拓扑结构的限制 .....     | 291        |
| 11.6 CSMA/CD 光纤局域网 .....          | 292        |
| 11.6.1 以太网简介 .....                | 292        |
| 11.6.2 CSMA/CD 光纤局域网物理层 .....     | 292        |
| 11.6.3 CSMA/CD 总线型光纤网中的碰撞检测 ..... | 293        |
| 11.6.4 与碰撞检测有关的延迟决定的网径 .....      | 295        |
| 11.7 令牌环 .....                    | 296        |
| 11.8 1773(1553B) 光纤数据总线 .....     | 297        |
| 主要参考文献 .....                      | 299        |
| <b>第十二章 光纤城域网 .....</b>           | <b>300</b> |
| 12.1 光纤城域网简介 .....                | 300        |
| 12.2 MAN 传输标准 .....               | 300        |
| 12.3 光纤分布数据接口(FDDI)令牌环 .....      | 301        |
| 12.3.1 FDDI 各层功能 .....            | 301        |
| 12.3.2 FDDI 令牌环工作原理 .....         | 302        |
| 12.3.3 FDDI 站结构 .....             | 303        |
| 12.3.4 光环路保护及可旁路站的考虑 .....        | 305        |
| 12.3.5 FDDI 物理层技术规范及网络性能 .....    | 306        |
| 12.3.6 FDDI-II .....              | 306        |
| 12.4 分布排队双总线(DQDB) .....          | 307        |
| 12.5 宽带综合业务数字网(B-ISDN) .....      | 308        |
| 12.5.1 综合业务数字网(ISDN) .....        | 308        |
| 12.5.2 宽带综合业务数字网(B-ISDN) .....    | 310        |
| 12.5.3 用户接入网 .....                | 313        |
| 12.6 城域网中视频图像的光纤传输 .....          | 319        |
| 12.6.1 CATV 概述 .....              | 319        |
| 12.6.2 光缆传输视频图像势在必行 .....         | 320        |
| 12.6.3 视频图像光纤传输标准 .....           | 321        |
| 12.6.4 AM-VSB/FDM 图像传输设计 .....    | 322        |
| 12.6.5 FM/FDM 视频传输 .....          | 327        |
| 12.6.6 PCM/TDM 视频传输 .....         | 329        |
| 12.6.7 WDM 视频信号传输 .....           | 331        |
| 主要参考文献 .....                      | 332        |

|                       |            |
|-----------------------|------------|
| <b>十三章 SDH 网络</b>     | <b>333</b> |
| 13.1 SDH 简介           | 333        |
| 13.1.1 PDH 存在的问题      | 333        |
| 13.1.2 SDH 的基本概念      | 335        |
| 13.1.3 SDH 技术特点       | 335        |
| 13.1.4 SDH 传输速率       | 336        |
| 13.2 SDH 的帧结构         | 337        |
| 13.3 复用映射结构           | 338        |
| 13.4 SDH 系统组成         | 339        |
| 13.4.1 系统组成           | 339        |
| 13.4.2 SDH 设备类型       | 340        |
| 13.5 光接口规范            | 342        |
| 13.5.1 光接口规范的目的       | 342        |
| 13.5.2 光接口分类          | 342        |
| 13.5.3 光接口参数规范        | 343        |
| 13.5.4 光传输设计方法        | 350        |
| 13.6 电接口规范            | 350        |
| 13.6.1 PDH 支路的电接口参数   | 350        |
| 13.6.2 STM-1 电接口参数    | 350        |
| 13.7 同步定时要求           | 351        |
| 13.7.1 网同步的概念         | 351        |
| 13.7.2 网同步方式          | 351        |
| 13.7.3 SDH 网同步结构      | 352        |
| 13.7.4 SDH 同步网方式      | 352        |
| 13.8 线路保护倒换           | 353        |
| 13.8.1 路径保护           | 353        |
| 13.8.2 路由保护           | 355        |
| 13.8.3 保护倒换准则和检测时间    | 355        |
| 13.9 SDH 的传输性能量度      | 356        |
| 13.9.1 假设参考通道和数字段     | 356        |
| 13.9.2 误码特性           | 357        |
| 13.9.3 抖动性能           | 361        |
| 13.9.4 可用性和可靠性        | 363        |
| 13.10 网络管理            | 368        |
| 主要参考文献                | 370        |
| <b>第十四章 多信道通信系统</b>   | <b>371</b> |
| 14.1 概述               | 371        |
| 14.2 波分复用网络           | 372        |
| 14.2.1 大容量点对点通信       | 372        |
| 14.2.2 广播分配网络         | 374        |
| 14.2.3 多路访问局域网 (LAN)  | 375        |
| 14.3 波长路由选择网络         | 376        |
| 14.4 微波副载波复用 (SCM) 网络 | 376        |
| 14.4.1 副载波复用的特点       | 377        |
| 14.4.2 模拟 SCM 光波系统    | 378        |
| 14.4.3 相干 SCM 光波系统    | 382        |

|             |                       |            |
|-------------|-----------------------|------------|
| 14.5        | 波分-微波副载波(WDM/SCM)混合网络 | 386        |
| 14.6        | 波分-时分(WDM/TDM)混合网络    | 388        |
| 14.7        | 光时分复用技术(OTDM)         | 389        |
| 14.7.1      | 光时分复用和解复用原理           | 389        |
| 14.7.2      | OTDM 高比特率传输实验         | 392        |
| 14.7.3      | OTDM 高比特率传输技术         | 393        |
| 14.8        | 限制多信道通信系统性能的因素        | 396        |
| 14.8.1      | 线性串话                  | 396        |
| 14.8.2      | 非线性串话                 | 399        |
| 14.8.3      | 其他限制因素                | 403        |
|             | 主要参考文献                | 405        |
| <b>第十五章</b> | <b>系统设计和限制</b>        | <b>408</b> |
| 15.1        | 工作波长和系统限制             | 408        |
| 15.1.1      | 损耗限制系统                | 409        |
| 15.1.2      | 色散限制系统                | 410        |
| 15.2        | 系统设计                  | 411        |
| 15.2.1      | 功率预算                  | 411        |
| 15.2.2      | 系统带宽                  | 412        |
| 15.3        | 系统设计中引起功率代价的其他因素      | 414        |
| 15.3.1      | 光纤模式噪声                | 414        |
| 15.3.2      | 色散引起的脉冲展宽             | 415        |
| 15.3.3      | 激光器模式分配噪声             | 416        |
| 15.3.4      | LD 的频率啁啾              | 419        |
| 15.3.5      | 反射噪声                  | 421        |
|             | 主要参考文献                | 424        |
| <b>第十六章</b> | <b>ATM 传输网络</b>       | <b>425</b> |
| 16.1        | 电路交换和分组交换             | 425        |
| 16.1.1      | 电路交换                  | 425        |
| 16.1.2      | 分组交换                  | 427        |
| 16.1.3      | 交换系统的进展               | 428        |
| 16.2        | ATM 基本概念              | 429        |
| 16.2.1      | ATM 技术和 STM 技术的比较     | 430        |
| 16.2.2      | ATM 信元结构              | 431        |
| 16.2.3      | ATM 复用和交换原理           | 433        |
| 16.3        | ATM 层模型               | 437        |
| 16.3.1      | 物理层                   | 438        |
| 16.3.2      | ATM 层                 | 439        |
| 16.3.3      | ATM 适应层(AAL)          | 440        |
| 16.4        | ATM 交换网络体系结构          | 441        |
| 16.4.1      | ATM 网络传输体系            | 441        |
| 16.4.2      | ATM 信元交换体系结构          | 441        |
| 16.4.3      | ATM 交换网络结构            | 443        |
| 16.4.4      | ATM VC 网的呼叫建立和带宽管理    | 444        |
| 16.5        | ATM VP 网络交换体系结构       | 445        |
| 16.5.1      | 虚通道(VP)分配的建立          | 446        |
| 16.5.2      | ATM VP 网络的虚通道容量分配     | 446        |

|                                    |     |
|------------------------------------|-----|
| 16.5.3 虚通道的应用 .....                | 447 |
| 16.6 ATM 网络的生存性 .....              | 447 |
| 16.6.1 业务保护等级 .....                | 447 |
| 16.6.2 ATM VP 技术对网络生存性设计的影响 .....  | 448 |
| 16.6.3 可生存的 ATM/SDH 虚通道网络 .....    | 448 |
| 16.7 ATM 虚通道环网 .....               | 449 |
| 16.7.1 ATM VP 环网的优点 .....          | 449 |
| 16.7.2 点对点 ATM VP 环网 .....         | 450 |
| 16.8 ATM/DCS 栅格网 .....             | 451 |
| 16.8.1 ATM/DCS 系统 .....            | 451 |
| 16.8.2 ATM/DCS 和 SDH DCS 的比较 ..... | 453 |
| 16.8.3 ATM VP 自愈网设计概念 .....        | 453 |
| 16.9 结论 .....                      | 454 |
| 主要参考文献 .....                       | 454 |

## 第十七章 光交换 ..... 456

|                                 |     |
|---------------------------------|-----|
| 17.1 光交换分类 .....                | 456 |
| 17.2 光交换器件 .....                | 457 |
| 17.3 时分交换 .....                 | 460 |
| 17.4 波分光交换 .....                | 461 |
| 17.5 空分光交换 .....                | 462 |
| 17.6 自由空间光交换 .....              | 463 |
| 17.6.1 自由空间交换的特点和分类 .....       | 464 |
| 17.6.2 自由空间光交换网络 .....          | 464 |
| 17.7 ATM 光交换技术 .....            | 467 |
| 17.7.1 信元交换结构 .....             | 467 |
| 17.7.2 使用超窄光脉冲的广播选择星形网络 .....   | 467 |
| 17.7.3 立方体光阵列开关网络 .....         | 468 |
| 17.8 混合光交换 .....                | 469 |
| 17.8.1 不同光交换系统对复用级数的限制 .....    | 469 |
| 17.8.2 时分/空分混合交换系统 .....        | 470 |
| 17.8.3 波分/空分混合交换系统 .....        | 471 |
| 17.8.4 FDM/TDM 混合交换系统 .....     | 472 |
| 17.8.5 FDM/TDM/SDM 混合交换网络 ..... | 472 |
| 17.9 多维交换系统 .....               | 473 |
| 17.9.1 多维光网络结构 .....            | 473 |
| 17.9.2 多维交换光网络应用 .....          | 475 |
| 17.10 光分插复用(OADM) .....         | 476 |
| 17.11 光互连 .....                 | 477 |
| 主要参考文献 .....                    | 478 |

## 第十八章 海底光缆通信技术 ..... 479

|                                 |     |
|---------------------------------|-----|
| 18.1 前言 .....                   | 479 |
| 18.2 第三代海底光缆系统在全球电信网络中的结构 ..... | 481 |
| 18.2.1 全球网络结构 .....             | 481 |
| 18.2.2 海底光缆网络拓扑结构 .....         | 484 |
| 18.3 第三代海底光缆系统设计 .....          | 486 |
| 18.3.1 系统设计和用户要求 .....          | 486 |

|             |                                      |            |
|-------------|--------------------------------------|------------|
| 18.3.2      | 发展中的海底光缆系统设计技术 .....                 | 488        |
| 18.3.3      | 海底光缆系统介绍 .....                       | 493        |
| 18.3.4      | 性能和运行 .....                          | 495        |
| 18.3.5      | 损耗和性能预算 .....                        | 496        |
| 18.4        | 海底光缆光放大中继技术 .....                    | 500        |
| 18.4.1      | 海底中继器 .....                          | 500        |
| 18.4.2      | 分支单元 .....                           | 502        |
| 18.4.3      | 终端传输设备 .....                         | 504        |
| 18.4.4      | 线路监控 .....                           | 506        |
| 18.4.5      | 供电设备 .....                           | 509        |
| 18.5        | 海底光缆无中继技术 .....                      | 509        |
| 18.5.1      | 传输终端 .....                           | 510        |
| 18.5.2      | 无中继系统设计和结构 .....                     | 515        |
| 18.5.3      | 无中继系统维护设备 .....                      | 516        |
| 18.5.4      | 无中继系统发展趋向 .....                      | 517        |
|             | 主要参考文献 .....                         | 518        |
| <b>附录 A</b> | <b>电磁波频率与波长的换算 .....</b>             | <b>520</b> |
| <b>附录 B</b> | <b>dBm 与 mW 换算表 .....</b>            | <b>520</b> |
| <b>附录 C</b> | <b>百分损耗(%)与分贝(dB)损耗换算表 .....</b>     | <b>520</b> |
| <b>附录 D</b> | <b>ITU-T 关于波分复用系统波长安排的建议草案 .....</b> | <b>521</b> |
| <b>附录 E</b> | <b>术语汇编 .....</b>                    | <b>524</b> |

# 第一章 光纤和光缆

光纤是通信网络的优良传输介质,尤其以石英( $\text{SiO}_2$ )系光纤得到的应用最为广泛。和电缆相比,光纤具有信息传输容量大,中继距离长,不受电磁场干扰,保密性能好和使用轻便等优点。随着技术的进步,光纤价格逐年下降,应用范围不断扩展。光纤通信在高速率长距离干线网和用户网方面的发展潜力都很大。为保证光纤性能稳定,系统运行可靠,必须根据实际使用环境设计各种结构的光缆。本章从应用的观点概述光纤和光缆的类型和特性。

## 1.1 光纤结构和类型

光纤是由中心的纤芯和外围的包层组成的同轴圆柱形石英细丝。纤芯的折射率比包层稍高,损耗比包层更低,光能量主要在纤芯传输。包层为光的传输提供反射面和光隔离,并起一定的机械保护作用。设纤芯和包层的折射率分别为  $n_1$  和  $n_2$ , 光能量在光纤中传输的必要条件是  $n_1 > n_2$ , 纤芯和包层的相对折射率差  $\Delta = (n_1 - n_2)/n_1$ , 其典型值, 单模光纤为 0.3%~0.6%, 多模光纤为 1%~2%。 $\Delta$  越大,把光能量束缚在纤芯的能力越强。

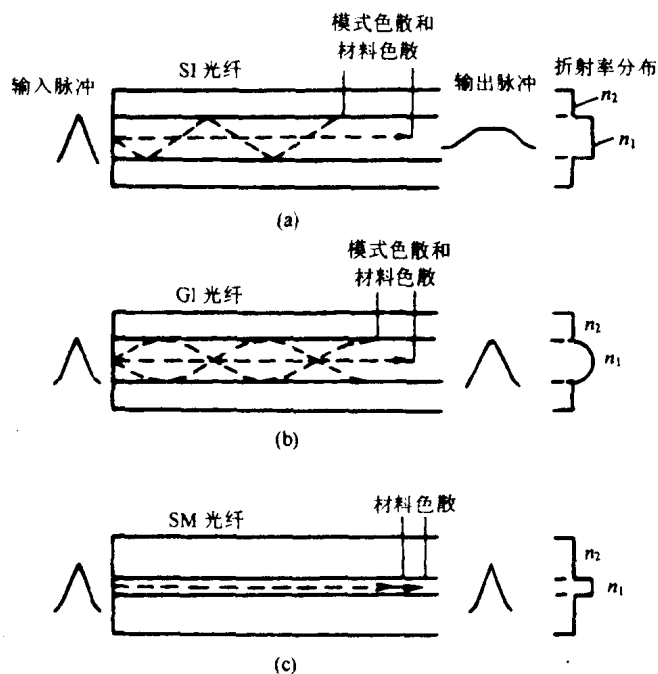


图1.1 实用光纤三种基本类型

(a) 突变型(SI)多模光纤 (b) 渐变型(GI)多模光纤 (c) 单模(SM)光纤

作为信息传输波导,实用光纤有多模和单模两种基本类型。图 1.1 示出光线在纤芯传播的

路径和由于色散引起的输出脉冲相对于输入脉冲的畸变, 以及光纤横截面的折射率分布。

### 1.1.1 多模光纤

**突变型(SI, Step Index)多模光纤** 折射率在纤芯为  $n_1$  保持不变, 到包层突然变为  $n_2$ 。一般纤芯直径  $2a=50 \sim 100\mu\text{m}$ , 光线以曲折形状传播, 脉冲信号畸变大。

**渐变型(GI, Graded Index)多模光纤** 折射率在纤芯中心最大为  $n_2$ , 沿径向往外逐渐变小, 直到包层变为  $n_2$ 。一般纤芯直径  $2a=50\mu\text{m}$ , 光线以正弦形状传播, 脉冲信号畸变小。

SI 和 GI 光纤可以传播数百到上千个模式, 故称为多模(MM, Multimode)光纤。多模突变型光纤信号畸变大, 相应的带宽大约只有  $10\text{MHz} \cdot \text{km}$ , 通常用于短距离传输。多模渐变型光纤带宽可达  $1\text{-}2\text{GHz} \cdot \text{km}$ , 信息传输容量比突变型光纤大  $100 \sim 200$  倍。虽然如此, 对于中继距离在  $30\text{km}$  以上, 传输  $620\text{Mb/s}$  到  $2.5\text{Gb/s}$  速率的干线通信系统, GI 光纤还是不能满足要求。高速率长距离传输系统, 采用带宽极大的单模光纤最为合适。

### 1.1.2 单模光纤

标准单模(SM, Single Mode)光纤折射率分布和突变型光纤相似, 纤芯直径很小, 模场直径只有  $9 \sim 10\mu\text{m}$ , 光线沿轴线直线传播, 信号畸变很小。这种光纤只能传播一个模式(两个偏振态简并), 故称为单模光纤。

事实上, 为调整工作波长或改变色散特性, 可以设计出各种结构复杂的单模光纤。已经开发的有色散移位光纤、非零色散移位光纤、色散补偿光纤, 以及在  $1.55\mu\text{m}$  衰减最小的光纤等。

## 1.2 光纤传输原理

### 1.2.1 传输条件

为简单和直观起见, 以突变型光纤交轴(子午)光线为例, 用光线光学方法说明光纤传输条件。如图 1.2 所示, 光线在光纤端面以不同角度  $\theta$  从空气入射到纤芯( $n_0 < n_1$ ), 折射角为  $\theta_1$ 。折射后的光线在纤芯与包层交界面以不同角度  $\varphi$  入射到包层 ( $n_1 > n_2$ ), 此时不同  $\theta$  相应的光线将发生反射或折射。实际上存在一个临界角  $\theta_c$ , 当  $\theta < \theta_c$  时, 相应的光线在纤芯与包层交界面发生全反射而返回纤芯, 并以曲折形状向前传播, 如光线 1, 根据斯奈尔(Snell)定律得到

$$n_0 \sin \theta = n_1 \sin \theta_1 = n_1 \cos \varphi \quad (1.2.1)$$

当  $\theta = \theta_c$  时, 相应的光线以  $\varphi_c$  入射到纤芯与包层交界面, 并沿交界面向前传播(折射角为  $90^\circ$ ), 如光线 2。当  $\theta > \theta_c$  时, 相应的光线将折射进入包层并逐渐消失, 如光线 3。因此, 只有在半锥角为  $\theta_c$  的圆锥内入射的光线才能在光纤中传播。定义临界角  $\theta_c$  的正弦为数值孔径(NA, Numerical Aperture), 按定义和斯奈尔(Snell)定律:

$$\text{NA} = n_0 \sin \theta_c = n_1 \cos \varphi_c \quad n_1 \sin \varphi_c = n_2 \sin 90^\circ$$

设  $n_0 = 1$ , 简单计算得到

$$NA = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = n_1 \sqrt{2\Delta} \quad (1.2.2)$$

式中  $\Delta = (n_1 - n_2)/n_1$  为纤芯与包层相对折射率差。设  $\Delta = 1\%$ ,  $n_1 = 1.5$ , 得到  $NA = 0.21$  或  $\theta_c = 12.1^\circ$ 。

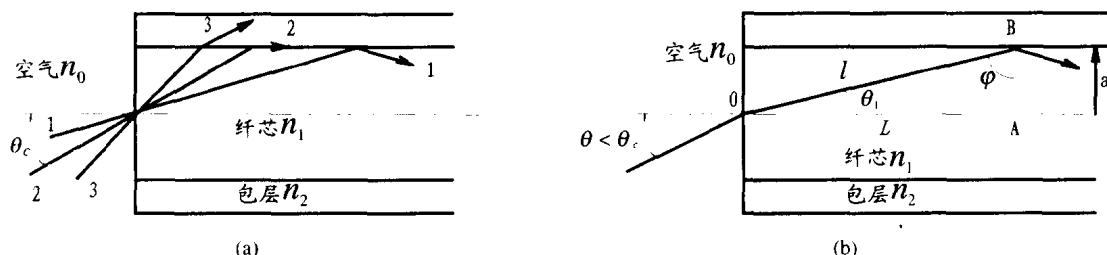


图1.2 光纤传输条件  
(a) 不同入射角  $\theta$  的光线 (b)  $\theta < \theta_c$  的光线

NA 表示光纤接收和传输光的能力。NA(或  $\theta_c$ ) 越大, 光纤接收光的能力越强, 从光源到光纤的耦合效率越高。对无损耗光纤, 在  $\theta_c$  内的入射光都能在光纤中传输。NA 越大, 纤芯对光能量的束缚越强, 光纤抗弯曲性能越好。但 NA 越大, 经光纤传输后产生的信号畸变越大, 因而限制了信息传输容量。所以要根据使用场合, 选择适当的 NA。

突变型光纤的信号畸变大, 这是由于不同入射角的光线经光纤传输后时间延迟不同而产生的。由图 1.2(b) 可见, 入射角为  $\theta$  的光线在长度为  $L$  (OA) 的光纤中传输, 所经历的路程为  $l$  (OB), 在  $\theta$  不大的条件下, 其时间延迟为

$$\tau = \frac{n_1 l}{c} = \frac{n_1 L}{c} \sec \theta_1 \approx \frac{n_1 L}{c} \left( 1 + \frac{\theta_1^2}{2} \right) \quad (1.2.3)$$

式中  $c$  为光速。由式(1.2.3)得到最大入射角( $\theta = \theta_c$ )和最小入射角( $\theta = 0$ )的光线之间时间延迟差(信号畸变)为

$$\Delta\tau = \frac{L}{2n_1 c} \theta_c^2 = \frac{L}{2n_1 c} (NA)^2 = \frac{n_1 L}{c} \Delta \quad (1.2.4)$$

结果表明, 突变型光纤的信号畸变取决于 NA。设  $NA = 0.20$ ,  $n_1 = 1.5$ ,  $L = 1\text{km}$ , 由式(1.2.4)得到  $\Delta\tau = 44\text{ ns}$ , 带宽约相当于  $10\text{MHz} \cdot \text{km}$ 。

为减小信号畸变, 研究渐变型光纤。在这种光纤中, 入射角大的光线沿折射率较低的纤芯边缘传播, 用较快的传播速度 ( $v = c/n$ ) 补偿了较长的路程, 使不同入射角的光线时间延迟接近均衡。因而减小了信号畸变, 扩大了带宽。有关光纤信号畸变在 1.3.1 节还要讨论。

## 1.2.2 光纤模式

光波是电磁波, 光纤中的电磁场仍遵守麦克斯威方程。解波动方程可以得到光纤模式特性, 用模式理论能更准确说明光纤传输原理。设光纤无损耗, 折射率  $n$  变化很小, 在光纤中传播的是角频率为  $\omega$  的单色光, 场与时间  $t$  的关系为  $\exp(j\omega t)$ , 则标量波方程为

$$\nabla^2 E + \left( \frac{n\omega}{c} \right)^2 E = 0 \quad (1.2.5)$$