

现代光通信技术丛书

现代光纤通信 与网络教程

张宝富 刘忠英 万谦等 编著

人民邮电出版社
POSTS & TELECOMMUNICATIONS PRESS

TN929.11

20

现代光通信技术丛书

现代光纤通信与网络教程

张宝富 刘忠英 万 谦 等编著

人民邮电出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

现代光纤通信与网络教程/张宝富, 刘忠英, 万谦等编著.

—北京: 人民邮电出版社, 2002.7

(现代光通信技术丛书)

ISBN 7-115-10209-0

I. 现... II. ①张... ②刘... ③万... III. 光纤通信—通信网—教材 IV. TN929.11

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2002) 第 029270 号

现代光通信技术丛书

现代光纤通信与网络教程

◆ 编 著 张宝富 刘忠英 万 谦 等
责任编辑 梁 凝

◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市崇文区夕照寺街 14 号

邮编 100061 电子函件 315@ptpress.com.cn

网址 <http://www.ptpress.com.cn>

读者热线 010-67180876

北京汉魂图文设计有限公司制作

北京顺义振华印刷厂印刷

新华书店总店北京发行所经销

◆ 开本: 787×1092 1/16

印张: 22.5

字数: 543 千字

2002 年 7 月第 1 版

印数: 1-5 000 册

2002 年 7 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-115-10209-0/TN · 1858

定价: 36.00 元

本书如有印装质量问题, 请与本社联系 电话: (010) 67129223

内 容 提 要

本书全面而系统地论述了现代光纤通信与网络的主流应用技术及发展方向。全书共分四个部分。第一部分：基础篇，简要介绍了现代光纤通信与网络的特点、光波在光纤中的复用与放大原理、半导体光器件的工作原理，重点介绍了各种新型的常用光器件和各类单模光纤。第二部分：系统篇，介绍了光纤通信系统的基本组成以及各类典型系统，重点介绍了传输系统的设计，包括光发送机、光接收机、光放大器、中继距离的设计以及光纤的选型等和系统性能评估方法，对两种主要系统即强度调制直接检测(IM-DD)与波分复用系统(WDM)的性能进行了评估。第三部分：网络篇，从总体上介绍了各类光纤网络，详细分析了 SDH 光同步传送网及其同步复用的原理、网络同步、自愈环网的构成及保护恢复、节点设备等，并重点介绍了波长选路光网络 WRN 的光通道与波长路由、波长选路与光交换、网管等。第四部分：应用篇，介绍了多业务光纤接入网、高速光纤以太网等。

本书取材广泛，内容新颖实用，力求让读者从整体上把握现代光纤通信与网络的基本原理、相关技术以及应用全貌；行文通俗易懂、深入浅出，并配有丰富的图表，各部分独立成篇。本书适合不同层面的读者选用，可以作为高等院校各类通信、广播电视、计算机网络、光信息技术、光电子技术、信息管理等专业的教材及各类光纤通信技术培训班用书，也适合广大科研和工程技术人员阅读和参考。

前 言

光纤通信的诞生是通信史上的一场革命，其发展速度之快也实为通信史上所罕见。目前光纤通信正由应用于点到点之间的链路向网络渗透，原有意义上的光纤通信已不能涵盖现代光纤通信与网络的内容。现代光纤通信普遍采用单模光纤取代多模光纤，用光放大器代替电中继器，用多波长光载波代替单个波长光载波来携带信息；单个波长的传输速率已达 10Gbit/s 甚至 40Gbit/s；并以网络应用为主，如吉比特光纤以太网、SDH 光同步传送网等。为了让读者能全面而系统地了解现代光纤通信与网络的特点、基本原理，掌握主流应用技术，对光纤通信的下一步发展，即全光网络有所了解我们编写了此书。本书从构筑光纤通信的基石——光纤通信器件和通信光纤讲起，一直到即将应用的 DWDM 全光网络这一崭新的技术。由于涉及光纤通信很多内容，跨度大，因此本书将写作特点定为：内容的选择紧扣基本理论为技术服务，相应技术服务于实际应用的需要，将材料组织成具有一定深度的有机整体，对于具有理论价值但对实际应用意义不大的、陈旧的或技术上先进但相对不成熟的内容不予介绍；在典型应用中讲解重点技术，主要面对国内外普遍采用的技术；行文通俗易懂，基本概念和基本原理讲解准确清晰，避免繁琐的公式，着重论述结论的物理含义；书中配有丰富图表来配合文字的叙述，形象直观。本书可适应不同层面的读者选用，既可作为高等院校的通信、计算机网络、广播电视等相关专业的教材，也适合作为各类光纤通信技术培训班的用书，以及供科研和工程技术人员阅读、参考。

全书分四个部分，第一部分为基础篇，共四章，第 1 章绪论，介绍光纤通信的发展、系统与网络的概念及现代光纤通信的特点。第 2 章通信光纤，介绍光纤的传输特性、光纤中信号的传输及各类新型的单模光纤。第 3 章光纤通信器件，讲解光纤通信系统及网络采用的光器件。第 4 章光波复用与光放大，介绍光波中的波分复用（WDM）技术和其它复用方式，以及在复用系统中所需的光放大器。第二部分为系统篇，共三章，第 5 章光纤传输系统，介绍光纤通信系统的基本概念与组成，以及各类系统。第 6 章传输系统设计，介绍了系统光发送机、光接收机、光放大器、中继距离的设计方法以及光纤的选型。第 7 章系统性能评估，介绍了系统性能评估方法，分析了主要的两种系统，即强度调制直接检测(IM-DD)与波分复用系统(WDM)的性能评估。第三部分为网络篇，共三章，第 8 章光网络，从总体上介绍各类光纤网络。第 9 章 SDH 光同步传送网，重点介绍其同步复用的原理、自愈环网的构成及保护恢复、节点设备及网管。第 10 章 WDM 光传送网，重点介绍波长选路光网络的光通道与波长路由、波长选路与光交换、网管的特点。第四部分为应用篇，包括两章，第 11 章多业务光纤接入网，主要讲解无源光网络 PON，以及基于 PON 的宽带 ATM 接入，即 APON（ATM+PON）和用户环路载波（SLC）、采用 Cable-Modem（线缆调制解调器）的 HFC（混合光纤同轴网）等的接入。第 12 章高速光纤计算机网络，主要讲解吉比特超高速光纤以太网，和吉（太）比特计算机网络、FDDI、DQDB 等高速网络。

本书的第 5 章和第 6 章由刘忠英编写，第 8 章、第 11 章和第 12 章由万谦编写，第 2 章由张宝富、谭笑、周辉、刘杰、徐俊华共同完成，第 7 章由蒋慧娟、张宝富共同完成，其余各章由张宝富编写。

本书是作者根据多年从事光纤通信的教学与科研工作的体会编写而成，是一次大胆尝试，力求让读者从整体上把握现代光通信与网络的基本原理、相关技术以及应用的全貌。书中定有不足、不妥之处，欢迎批评指正。

作者

2001 年 10 月于南京

目 录

第一部分 基础篇

| | |
|---------------------------|----|
| 第1章 绪论 | 1 |
| 1.1 光纤通信的发展 | 1 |
| 1.1.1 光纤通信的概念 | 1 |
| 1.1.2 光纤通信的优点 | 2 |
| 1.1.3 光纤通信的发展与现状 | 4 |
| 1.2 光纤通信系统 | 5 |
| 1.2.1 系统的概念及模型 | 5 |
| 1.2.2 五代光纤通信系统 | 9 |
| 1.3 光纤通信网络 | 10 |
| 1.3.1 网络的概念 | 10 |
| 1.3.2 第二代光纤通信网络 | 12 |
| 1.4 现代光纤通信的特点 | 16 |
| 第2章 通信光纤 | 18 |
| 2.1 通信光纤概述 | 18 |
| 2.1.1 几何光学分析法 | 18 |
| 2.1.2 波动理论分析法 | 23 |
| 2.2 光纤的损耗特性 | 28 |
| 2.2.1 损耗的表示方法——损耗系数 | 28 |
| 2.2.2 损耗机理及损耗谱 | 29 |
| 2.3 光纤的色散特性 | 31 |
| 2.3.1 波长色散 | 31 |
| 2.3.2 材料色散 | 33 |
| 2.3.3 波导色散 | 36 |
| 2.3.4 高阶色散 | 38 |
| 2.3.5 偏振模色散(PMD) | 39 |
| 2.4 光纤中信号的线性传输 | 40 |
| 2.4.1 基本的传输方程 | 40 |
| 2.4.2 光脉冲的展宽 | 40 |
| 2.5 新型的单模光纤 | 45 |
| 2.5.1 色散位移光纤(DSF) | 46 |
| 2.5.2 大有效面积光纤(LEAF) | 46 |

| | | |
|------------|------------------|-----------|
| 2.5.3 | 保偏光纤(PMF) | 47 |
| 2.5.4 | 全波长光纤(All Wave) | 48 |
| 2.5.5 | 色散补偿光纤(DCF) | 48 |
| 2.5.6 | 色散平坦光纤 | 49 |
| 2.6 | 光纤的非线性效应 | 49 |
| 2.6.1 | 克尔效应 | 50 |
| 2.6.2 | 自相位调制(SPM) | 50 |
| 2.6.3 | 交叉相位调制(XPM/CPM) | 51 |
| 2.6.4 | 四波混频(FWM) | 52 |
| 2.6.5 | 受激拉曼散射(SRS) | 53 |
| 2.6.6 | 受激布里渊散射(SBS) | 54 |
| 2.7 | 光纤中信号的非线性传输 | 55 |
| 2.7.1 | 非线性传播方程 | 55 |
| 2.7.2 | 光脉冲的压缩 | 55 |
| 2.7.3 | 光孤子脉冲 | 56 |
| 第3章 | 光纤通信器件 | 60 |
| 3.1 | 光器件概述 | 60 |
| 3.2 | 半导体发光器件 | 60 |
| 3.2.1 | 发光基理 | 60 |
| 3.2.2 | 发光二极管(LED) | 64 |
| 3.2.3 | 半导体激光器的原理 | 66 |
| 3.2.4 | 半导体激光器的性质 | 69 |
| 3.2.5 | DFB 和 DBR 半导体激光器 | 74 |
| 3.2.6 | 垂直腔面发光激光器(VCSEL) | 75 |
| 3.2.7 | 光纤光栅外腔可调谐半导体激光器 | 75 |
| 3.2.8 | 超短光脉冲激光器 | 76 |
| 3.3 | 半导体光检测器 | 77 |
| 3.3.1 | 工作原理 | 77 |
| 3.3.2 | PIN | 81 |
| 3.3.3 | APD(雪崩光电二极管) | 83 |
| 3.4 | 光纤耦合器与隔离器 | 84 |
| 3.4.1 | N×N 星型耦合器 | 84 |
| 3.4.2 | 方向耦合器 | 85 |
| 3.4.3 | 光隔离器和环形器 | 86 |
| 3.5 | 光开关 | 87 |
| 3.5.1 | 光开关的概念与特点 | 87 |
| 3.5.2 | 主要的几种光开关 | 88 |
| 3.6 | 光纤光栅 | 89 |
| 3.6.1 | 光纤光栅的概念与分类 | 89 |

| | | |
|--------------|--------------------------|------------|
| 3.6.2 | 短周期布拉格 FBG 和长周期 LPG 光纤光栅 | 90 |
| 3.6.3 | 光纤光栅的制作方法 | 91 |
| 3.6.4 | 光纤光栅的应用 | 92 |
| 3.7 | 光波长复用器与滤波器 | 92 |
| 3.7.1 | 概述 | 92 |
| 3.7.2 | 光纤光栅 | 92 |
| 3.7.3 | 马赫-曾德尔干涉仪(MZI) | 93 |
| 3.7.4 | 阵列波导光栅(AWG) | 94 |
| 3.7.5 | 声光可调滤波器(AOTF) | 96 |
| 3.8 | 光波长变换器 | 97 |
| 3.8.1 | 概述 | 97 |
| 3.8.2 | 光电光型波长变换器 | 98 |
| 3.8.3 | 全光型波长变换器 | 98 |
| 3.8.4 | 波段变换器 | 100 |
| 第 4 章 | 光波复用与放大 | 101 |
| 4.1 | 光波复用与放大概述 | 101 |
| 4.2 | 波分复用(WDM) | 102 |
| 4.2.1 | WDM 基本原理 | 102 |
| 4.2.2 | 大容量的 WDM 传输 | 103 |
| 4.2.3 | 波长选路网络 WRN | 107 |
| 4.3 | 光码分复用(OCDMA) | 108 |
| 4.3.1 | OCDMA 基本原理 | 108 |
| 4.3.2 | OCDMA 编解码 | 110 |
| 4.3.3 | OCDMA 网络 | 112 |
| 4.4 | 光时分复用(OTDM) | 113 |
| 4.4.1 | OTDM 基本原理 | 113 |
| 4.4.2 | OTDM 合路/分路器 | 114 |
| 4.4.3 | OTDM 分组网络 | 115 |
| 4.5 | 光纤放大器(EDFA) | 117 |
| 4.5.1 | 基本概念 | 117 |
| 4.5.2 | 增益 | 120 |
| 4.5.3 | 增益特性 | 122 |
| 4.5.4 | 噪声 | 124 |
| 4.5.5 | 噪声指数(NF) | 128 |
| 4.6 | 半导体光放大器(SOA) | 129 |

第二部分 系 统 篇

| | | |
|--------------|---------------|------------|
| 第 5 章 | 光纤传输系统 | 131 |
| 5.1 | 两种典型应用的光纤传输系统 | 131 |

| | | |
|--------------|--------------------|------------|
| 5.1.1 | IM-DD 系统 | 131 |
| 5.1.2 | EDFA+WDM 系统 | 138 |
| 5.2 | 其它光纤传输系统 | 142 |
| 5.2.1 | 相干检测系统 | 142 |
| 5.2.2 | 光纤孤子传输系统 | 146 |
| 5.2.3 | SCM 系统 | 148 |
| 第 6 章 | 传输系统设计 | 152 |
| 6.1 | 系统设计考虑 | 152 |
| 6.2 | 光发送机 | 153 |
| 6.2.1 | 平均输出光功率 | 153 |
| 6.2.2 | 消光比 | 154 |
| 6.2.3 | 光信噪比(OSNR) | 154 |
| 6.3 | 光接收机 | 154 |
| 6.3.1 | 接收灵敏度 | 155 |
| 6.3.2 | 接收机过载功率 | 155 |
| 6.4 | 光放大器 | 156 |
| 6.4.1 | 放大器的级联 | 156 |
| 6.4.2 | 自动增益控制(AGC) | 157 |
| 6.4.3 | 光监控通道(OSC) | 158 |
| 6.5 | 光纤的选用 | 160 |
| 6.5.1 | 概述 | 160 |
| 6.5.2 | G.652 光纤(常规单模光纤) | 160 |
| 6.5.3 | G.653 光纤(色散位移光纤) | 161 |
| 6.5.4 | G.655 光纤(非零色散位移光纤) | 161 |
| 6.5.5 | 大有效面积光纤 | 162 |
| 6.6 | IM-DD 系统 | 162 |
| 6.6.1 | 光功率预算 | 163 |
| 6.6.2 | 色散预算 | 164 |
| 6.6.3 | 上升时间预算 | 166 |
| 6.7 | EDFA+WDM 系统 | 168 |
| 6.7.1 | 波长分配方案 | 168 |
| 6.7.2 | 通道间隔与波长数目 | 169 |
| 6.7.3 | 串扰 | 169 |
| 6.7.4 | 光放大器的跨度 | 173 |
| 6.7.5 | 单通道的光功率 | 174 |
| 第 7 章 | 传输系统性能评估 | 176 |
| 7.1 | 基本光传输系统的数学模型 | 177 |
| 7.1.1 | 强度调制直接检测系统 | 177 |
| 7.1.2 | 相位调制相干系统 | 179 |

| | |
|-------------------------------|-----|
| 7.2 光传输系统的性能评定 | 181 |
| 7.2.1 直接检测系统的性能 | 183 |
| 7.2.2 相干系统的性能 | 190 |
| 7.2.3 IM-DD WDM 系统中的串扰 | 190 |
| 7.3 采用光放大器的传输系统 | 192 |
| 7.3.1 光放大系统的设计 | 192 |
| 7.3.2 理想光纤传输条件下光放大系统的性能 | 194 |

第三部分 网络篇

| | |
|---------------------------------|-----|
| 第 8 章 光网络 | 199 |
| 8.1 计算机互连 | 199 |
| 8.1.1 CSMA/CD 光纤总线网 | 201 |
| 8.1.2 光纤分布式数据接口 FDDI | 206 |
| 8.1.3 高性能并行接口 HIPPI | 209 |
| 8.1.4 光纤通道 | 210 |
| 8.2 用户接入 | 213 |
| 8.2.1 光纤同轴混合网(HFC) | 214 |
| 8.2.2 光纤到户(FTTH) | 218 |
| 8.3 长途传送 | 218 |
| 8.3.1 SDH 同步网络 | 218 |
| 8.3.2 多波长光网络 | 220 |
| 第 9 章 SDH 光同步数字传送网 | 222 |
| 9.1 基本概念 | 222 |
| 9.1.1 什么是 SDH | 222 |
| 9.1.2 SDH 的优点 | 223 |
| 9.1.3 SDH 的速率体系 | 225 |
| 9.1.4 SDH 的帧结构 | 226 |
| 9.1.5 STM-1 段开销功能 | 228 |
| 9.2 SDH 的同步复用原理 | 230 |
| 9.2.1 虚容器(VC)与通道(P) | 230 |
| 9.2.2 复用映射结构与过程 | 233 |
| 9.2.3 2.048Mbit/s(2M 口)举例 | 235 |
| 9.2.4 ATM 信元的映射 | 238 |
| 9.2.5 IP 数据报的映射 | 239 |
| 9.3 SDH 网络同步 | 239 |
| 9.3.1 SDH 网络同步的必要性 | 239 |
| 9.3.2 SDH 网络同步方法 | 240 |
| 9.3.3 网同步示例 | 243 |
| 9.4 SDH 网络结构 | 244 |

| | | |
|---------------|---|------------|
| 9.4.1 | 分层 | 244 |
| 9.4.2 | 自愈环 | 245 |
| 9.5 | SDH 网络保护-自愈环网 | 246 |
| 9.5.1 | 通道保护(PPS) | 247 |
| 9.5.2 | 复用段共享保护(MS-SPRing) | 248 |
| 9.6 | SDH 节点设备 | 249 |
| 9.6.1 | TM(终端复用器) | 249 |
| 9.6.2 | ADM(分插复用器) | 251 |
| 9.6.3 | DXC(数字交叉连接) | 252 |
| 9.7 | SDH 网管 | 254 |
| 9.7.1 | SDH 网管概念 | 254 |
| 9.7.2 | SDH 网管功能 | 255 |
| 9.8 | 网管系统 | 256 |
| 第 10 章 | WDM 光传送网络(OTN) | 258 |
| 10.1 | 基本概念 | 258 |
| 10.1.1 | WDM 光传送网的优点 | 258 |
| 10.1.2 | 光通道与光路由选择策略 | 259 |
| 10.2 | 分层体系结构 | 260 |
| 10.2.1 | 光通道层(OCH) | 261 |
| 10.2.2 | 光复用段层(OMS) | 261 |
| 10.2.3 | 光放大/传输层(OA/TS) | 261 |
| 10.3 | 波长选路与光交换 | 264 |
| 10.3.1 | 光交换及优点 | 264 |
| 10.3.2 | 波长选路 | 264 |
| 10.3.3 | 波长交换 | 266 |
| 10.4 | 网络监控与管理 | 268 |
| 10.4.1 | 管理网的特点 | 268 |
| 10.4.2 | 管理通道的实现 | 269 |
| 10.4.3 | 光传送网管理系统的结构 | 272 |
| 10.5 | WDM 光传送网的节点设备 | 273 |
| 10.5.1 | WXC 的功能要求 | 275 |
| 10.5.2 | 基于空间交换的 WXC 的结构 | 276 |
| 10.5.3 | 基于多波长滤波器(MWSF)的 WXC 结构 | 277 |
| 10.5.4 | 基于平行波长开关的 WXC 结构 | 278 |
| 10.5.5 | 基于阵列波导光栅复用器(AWGM)和波段变换器(WID(n,r))的 WXC 结构 | 279 |

第四部分 应用篇

| | | |
|---------------|-----------------|------------|
| 第 11 章 | 多业务光纤接入网 | 281 |
| 11.1 | 接入业务 | 281 |

| | | |
|---------------|-------------------------------|------------|
| 11.1.1 | 电话业务 | 282 |
| 11.1.2 | 同轴电缆有线电视网(CATV) | 283 |
| 11.1.3 | IP 业务 | 283 |
| 11.1.4 | 异步转移模式(ATM) | 286 |
| 11.2 | 无源光网络(PON) | 290 |
| 11.2.1 | 电话无源光网络(TPON) | 292 |
| 11.2.2 | WDM-PON | 293 |
| 11.2.3 | WR-PON | 294 |
| 11.3 | PON 的应用 | 296 |
| 11.3.1 | APON(ATM+PON) | 296 |
| 11.3.2 | 用户环路载波系统(SLC 系统) | 300 |
| 11.4 | 采用电缆调制解调器(Cable Modem)的 HFC 网 | 302 |
| 11.4.1 | 双向 Cable Modem 系统 | 304 |
| 11.4.2 | 单向 Cable Modem 系统 | 307 |
| 第 12 章 | 高速光纤计算机网 | 311 |
| 12.1 | 光纤局域网概述 | 311 |
| 12.2 | 高速光纤数据分布接口(FDDI 环网) | 312 |
| 12.2.1 | FDDI 原理 | 312 |
| 12.2.2 | 网络构成 | 314 |
| 12.3 | 超高速光纤以太网 | 316 |
| 12.3.1 | 吉比特光纤以太网 | 316 |
| 12.3.2 | 交换式以太网 | 319 |
| 12.3.3 | 吉比特计算机网 | 321 |
| 12.4 | 其它计算机网络(DQDB) | 326 |
| 12.4.1 | DQDB 的特点 | 326 |
| 12.4.2 | DQDB 的工作原理 | 326 |
| 12.4.3 | DQDB 的体系结构 | 327 |
| 12.5 | 光互联网简介 | 330 |
| 12.5.1 | 光互联网的概念 | 330 |
| 12.5.2 | 光互联网的体系结构与波长路由器 | 332 |
| 附录 1 | 有助于误差概率计算的数学知识 | 335 |
| A1.1 | 马可尼 Q 函数 | 335 |
| A1.2 | 高斯随机变量二次厄密共轭形式的分布 | 336 |
| A1.3 | 柯西方程以及它的近似 | 338 |
| 附录 2 | 英文缩写词 | 341 |
| | 主要参考文献 | 346 |

第一部分 基础篇

第 1 章 绪 论

光纤通信从它诞生之日起，人们就预测到其有巨大的通信传输容量。今天这个时代已经到来，光纤通信已渗透到各种电信网络中，尤其是光波技术向网络交换节点的渗透，使得下一代光纤通信网络亦称全光网络成为现存网络升级的首选方案。为了使读者在系统学习之前对光纤通信有一基本了解，本章将对现代光纤通信与网络所涉及的基本概念作一简单的介绍。

1.1 光纤通信的发展

1.1.1 光纤通信的概念

光纤通信是指利用相干性和方向性极好的激光束作载波(称光载波)来携带信息，并利用光纤来进行传输的通信方式。

将需要传输的信息以某种方式调制在光载波上，进行远距离传输的思想早在上一个世纪已提出，但长期未得到发展，这主要有两方面的原因。其一是没有合适的光源，通常的自然光源及电光源光谱很宽，是非相干的，很难按无线电波方式进行调制以实现通信。其二是没有合适的传输媒介，光在大气中传播时受天气影响极为严重，且聚束也十分困难，而在一般的介质材料中传播损耗极大。在 20 世纪 60 年代以前，光在即便最好的光学玻璃中传播时其损耗也在每公里 1000dB 以上，在这样的介质中实现光信号的长距离传输显然也是不现实的。

20 世纪 50 年代末、60 年代初，激光的出现为实现现代意义上的光通信提供了合适的光源。激光器是根据原子、分子内能量变化制造的光波振荡器，是谱线极窄、方向性极好的相干光源，可以对其进行类似于无线电波那样的调制。半导体激光器由于其体积小、寿命长、价格低廉而成为实用化、商品化的通信光源。

70 年代初，低损耗光导纤维的问世为光通信提供了合适的传输媒介。1966 年英籍华裔科学家高锟博士指出，只要将石英玻璃中的金属离子含量大幅度降低，即可通过适当的拉丝

工艺制造出损耗低于 20dB/km 的玻璃纤维，可以用于长距离的信号传输。1970 年美国康宁玻璃公司率先根据这种思路制造了世界上第一根低损耗光导纤维，其损耗低于 20dB/km。此后低损耗光导纤维(简称光纤)的研究及制造技术取得了飞速的进步，到了 70 年代末，在 1.3 μm 波长上，石英光纤的损耗已降至 0.4dB/km；1.5 μm 波长上，已降至 0.2 dB/km 以下，这已接近石英系光纤损耗的理论极限。

由于半导体激光器和低损耗光纤的制造成功，20 世纪 70 年代初，一种崭新的通信方式——光纤通信问世，并得到了迅速发展。光纤通信的问世是通信史上的一场具有划时代意义的变革。

1.1.2 光纤通信的优点

光纤通信与电通信相比，主要区别有两点，一是以很高频率(10^{14} Hz 数量级)的光波作载波；二是用光纤作为传输介质。基于以上两点，光纤通信有以下的优点和缺点：

优点：(1) 传输频带很宽，通信容量大；(2) 中继距离长；(3) 抗电磁干扰；(4) 保密性好、无串话干扰；(5) 节约有色金属和原材料；(6) 线径细、重量轻；(7) 抗化学腐蚀、柔软可挠。

1. 传输频带宽、通信容量大

随着科学技术的迅速发展，人们对通信的要求越来越多。为了扩大通信容量，有线通信从明线发展到电缆，无线通信从短波发展到微波和毫米波，它们都是通过提高载波频率来扩容的，光纤中传输的光波要比无线通信使用的频率高得多，所以，其通信容量也就比无线通信大得多。

目前，光纤通信使用的频率范围一般为 3.5×10^{14} Hz(波长为 0.85 μm)，如果利用它带宽的一小部分，并假设一个话路占 4kHz 的频带，则一对光纤可以传送 10 亿路电话，它比我们今天所使用的所有通信系统的容量还大许多。然而实际上，由于光纤制造技术和光电器件特性的限制，一对光纤要传送 10 亿路电话是有困难的。目前的实用水平为每对光纤传送 30000 多话路(2.5Gbit/s)。

如果像电缆那样把几十根或几百根光纤组成一根光缆(即空分复用)，其外径比电缆小得多，传输容量却成百倍地增长，如果再使用波分复用技术(见第 4 章)，其传输容量就会大得惊人了，这样，就可以满足任何条件下信息传输的需要，对各种宽频带信息的传输具有十分重要的意义。

2. 中继距离长

我们知道，信号在传输线上传输，由于传输线的损耗会使信号不断衰减，信号传输的距离越长，衰减就越严重，当信号衰减到一定程度以后，对方就接收不到信号了。为了能进行长距离通信，往往需要在传输线路上设置许多中继器，将衰减了的信号放大后再继续传输。中继器越多，传输线路的成本就越高，维护也就越不方便，若某一中继器出现故障，就会影响全线的通信。因此，人们希望传输线路的中继器越少越好，最好是不要中继器。

减小传输线路的损耗是实现长中继距离的首要条件。因为光纤的损耗很低，所以能实现很长的中继距离。目前，实用石英光纤的损耗可低于 0.2dB / km，这比目前其它任何传输介质的损耗都低。由石英光纤组成的光纤通信系统最大中继距离可达 200 多 km。而现有的电通信，中同轴电缆系统最大中继距离为 6km，最长的微波中继距离也只有 50km 左右。如果

将来采用非石英系极低损耗光纤，其理论分析损耗可下降到 10^{-9} dB/km，则中继距离可达数千甚至数万 km。这样，在任何情况下，通信线路都可以不设中继器了，它对降低海底通信的成本、提高通信的可靠性和稳定性具有特别重要的意义。

3. 抗电磁干扰

任何信息传输系统都应具有一定的抗干扰能力，否则就无实用意义。而目前对通信形成干扰的干扰源比比皆是，有天然干扰源，如雷电干扰、电离层的变化和太阳的黑子活动等；有工业干扰源，如电动机和高压电力线；还有无线电通信的相互干扰等。抗干扰是现代通信必须认真对待的问题。一般说来，现有的电通信尽管采取了各种措施，但都不能满意地解决以上各种干扰的影响，唯有光纤通信不受以上各种电磁干扰的影响，这将从根本上解决多年来困扰人们的通信系统干扰问题。

4. 保密性好、无串话干扰

对通信系统的另一个重要要求是保密性好，然而，无线电通信很容易被人窃听，随着科学技术的发展，即使是我们以前所讲的保密性较好的有线电通信也不那么保密了。只要在明线或电缆附近设置一个特别的接收装置，就可以窃听明线或电缆中传输的信息，因此，现有的电通信都面临着一个怎样保密的问题。

光纤通信与电通信不同，光波在光纤中传输是不会跑出光纤之外的，即使在转弯处，弯曲半径很小时，漏出的光波也十分微弱，如果在光纤或光缆的表面涂上一层消光剂，光纤中的光就完全不能跑出光纤。这样，用什么方法也无法在光纤外面窃听光纤中传输的信息了。

此外，由于光纤中的光不会跑出来，我们在电缆通信中常见的串话现象，在光纤通信中就不存在了。同时，它也不会干扰其它通信设备或测试设备。

5. 节约有色金属和原材料

现有的电话线或电缆是由铜、铝、铅等金属材料制成的，但从目前的地质调查情况来看，世界上铜的储藏量不多，有人估计按现在的开采速度只能再开采 50 年左右。而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，并且很少的原材料就可控制出很长的光纤，例如，40g 高纯度的石英玻璃可控制 1km 的光纤，而制造 1km 八管中同轴电缆需要耗铜 120kg，铅 500kg。光纤通信技术的推广应用将节约大量的金属材料，具有合理使用地球资源的战略意义。

6. 线径细、重量轻

通信设备体积和重量对许多领域具有特殊重要的意义，特别在军事、航空和宇宙飞船等方面。光纤的芯径很细，它只有单管同轴电缆的 1/100；光缆直径也很小，8 芯光缆横截面直径约为 1mm，而标准同轴电缆为 47mm。线径细对减小通信系统所占的空间具有重要意义。目前，利用光纤通信的这个特点，在市话中继线路中成功地解决了地下管道拥挤的问题，节约了地下管道的建设投资。

光缆的重量比电缆要轻得多。例如，18 管同轴电缆 1m 的重量为 11kg，而同等容量的光缆每米重只有 90g。近年来，许多国家在飞机上使用光纤通信设备，或将原来的电缆通信改为光纤通信，获得了很好的效果，它不但降低了通信设备的成本和飞机制造的成本，而且提高了通信系统的抗干扰能力和飞机设计的灵活性。例如，美国在 A-7 飞机上用光纤通信取代原有的电缆通信后，它使飞机减轻重量 27 磅。据飞机设计人员统计，高性能的飞机每增加 1 磅的重量，成本费用要增加 1 万美元。如果考虑在宇宙飞船和人造卫星上使用光纤通信，其

意义就更大了。

光纤通信由于上述的许多优点，除了在公用通信和专用通信中广泛使用之外，还在其它许多领域，如测量、传感、自动控制和医疗卫生领域得到了十分广泛的应用。

1.1.3 光纤通信的发展与现状

20 世纪 70 年代以来，在短短的 30 年中光纤通信已经取得了突飞猛进的进展。回顾光纤通信的发展历程，可以看到光纤通信在提高传输速率或提高通信容量上下了很大的功夫。目前 2.5Gbit/s 的系统已经商用化，10Gbit/s 的系统也已投入使用。如果采用波分复用技术，一根光纤同时传多个光载波，则可进一步提高通信容量。光纤通信研究的另一个方向则是提高中继距离，采用的技术主要是提高接收机的灵敏度和提高入纤光功率。提高接收灵敏度的最有效的方法是采用相干光通信方式，而提高入纤光功率的最有效的方法是采用半导体激光放大器或光纤放大器。展望未来的光纤通信系统，必然仍将在超高速及超长距离无中继传输上下功夫。纵观光纤通信的发展过程，可以看到今后光纤通信将主要在以下几个方面发展：

(1) 传输体制从准同步体系向同步数字体系过渡，以适应建立全球统一的光纤网的要求。过去，光纤通信系统主要是基于 ITU-T G.702 建议所规范的准同步数字系列(PDH: Plesiochronous Digital Hierarchy)。随着光纤通信的迅速发展和普及应用，对高速率光纤通信系统的要求越来越迫切，B-ISDN 的发展及对电信管理网发展的需求都暴露了 PDH 系统的一系列问题，例如：① 原 PDH 系列规范本身就有两种体系，即以 1544kbit/s 为基群的北美体系和以 2048kbit/s 为基群的欧洲体系，而这两种体系之间互通和兼容非常困难。② 原 PDH 的各等级帧结构中，预留的插入比特(或者说开销)很少，远远不能满足网络维护管理的要求。③ 从光传输设备的角度来说，没有规范统一的光接口，因此光传输系统不是一种开放互连系统，不同厂家的设备在光路上无法互通。在这种情况下，经过一些国家的研究开发，ITU-T 在各国所提出的方案的基础上，经过研究和协调，于 1988 年 11 月通过了新的、关于同步数字系列 SDH(Synchronous Digital Hierarchy)的第一套建议，经不断完善形成了目前广泛采用的 SDH 标准。

(2) 由单波长通道向多波长通道过渡。下一代光纤通信系统可能仍将是强度调制直接检测(IM-DD)系统，但将采用波分复用 WDM 技术(当然包括 1.55 μm 的 DFB 激光器、光纤放大器和色散补偿技术)使光纤传输速率提高到几百 Gbit/s 以上，而中继距离也达数百公里。为了进一步扩大光波通信系统容量，采用了复接技术(MUX)来实现信号在空间域、频域、时间域上的复用，即空分、频分(波分)、时分、码分多址复用。空分复用采用多根光纤来传送信号，单根光纤是采用频分、时分、码分复用。频分复用在光域习惯称为密集波分复用，是目前最常用的光波复用方式，目前已有相当多的 DWDM 系统投入商用。

(3) 用户网的光纤化。光纤通信的另一个重要领域是实现电信网的全光纤化。实现通信网的全光纤化最困难的是光纤用户网，因而光纤用户网是近年来光纤通信领域中的研究热点。在未来的用户网中需要传输多种宽带业务，现在的电缆网可能无法担此重任；用户网从电缆网向光纤网过渡是大势所趋。目前由于光纤用户网成本较高，在价格上难以与电缆网竞争，加之图像压缩技术的进展，电缆网较窄的传输带宽还未成为致命的弱点，所以在用户网中电缆仍居于主要地位。随着光纤及光器件成本的降低以及用户对多种宽带业务需求的增长，估

计光纤用户网会取得突破性进展，电信网的全光纤化已为时不远了。

(4) **光交换节点将取代电交换节点。**由于采用波分复用技术使得传输速率极大提高，因而原有电交换机的速率成了整个网络的瓶颈，将被光交换机取代。所谓光交换是指对光纤传送的光信号直接进行交换。光交换是在光域中完成光交换功能，而无需将光信号转换成电信号，输入输出都是光信号，因而光交换有效地减小了延时，增大了系统的吞吐量。

(5) **相干光通信是未来的光纤通信方式。**它与传统的 IM-DD 系统相比，主要差别在于其接收机采用外差式接收或零差接收，在接收机中增加了本振光源和光混频器，具有混频增益，从而使得系统的接收灵敏度极高，而且具有出色的波长选择性。这些优点使得相干光通信必将在波分复用系统，尤其是密集波分复用系统(光频分复用系统)中发挥巨大的作用。相干光通信对光源的谱宽、光源的频率稳定性以及光的偏振(极化)特性、光纤的损耗、色散、偏振状态都提出了十分苛刻的要求，因而目前尚未实用化。随着时间的推移，上述问题必将得到解决。不久的将来，人们就像现在调谐无线电接收机那样，通过调节光接收机的本振光源波长，即可从众多的信息通道中极为方便地调出所需要的任何信息。

(6) **孤子通信与全光系统。**光脉冲在光纤中传输时，光纤的色散效应会导致光脉冲的展宽，从而限制了传输速率和中继距离。而光纤的非线性作用则刚好相反，它使脉冲在传输过程中变窄，并最终导致脉冲破裂，从而限制了入纤光功率。如果同时利用上述两种作用，则在一定条件下可以使光纤的非线性效应与色散效应相互抵消，从而保持光脉冲形状在传播过程中不变形，而形成所谓的孤子。产生光孤子的条件是光脉冲要足够窄，脉冲能量在一定范围之内。大量的实验表明，当光脉冲宽度小于几十个皮秒(10^{-12} 秒)，入纤功率达到几十毫瓦时，光纤中将会产生孤立子。利用光孤子通信，在理论上几乎没有容量限制，其传输速率可高达 1000Gbit/s。用这样的速率传输信息，世界上最大的图书馆——美国国会图书馆的全部藏书只需 100s 即可传送完毕。将孤子传输技术与光放大技术相结合即可抛弃传统的光—电—光再生中继方式，实现超长距离、超高速的全光通信。实现全光通信的关键是光孤子的产生及光孤子的编码调制技术以及光放大技术。近年来光孤子通信取得了突破，例如日本 NTT 公司采用 DFB 激光器产生脉宽为 30~45ps 的光脉冲，再利用马赫—曾德尔光脉冲调制器对光孤子进行编码，数据速率达到 10Gbit/s，在 510km 的光纤环中，每隔 50km 加一光纤放大器(EDFA)，传输 10^6 km 以后，光孤子的形状几乎不变。距光孤子通信的真正实用化还有待时日，但光孤子通信的诱人前景必将吸引世界各国科学家、工程师不遗余力地去解决实用化过程中的难题。可以预料，以光孤子通信为标志的全光通信时代，必将到来。

1.2 光纤通信系统

1.2.1 系统的概念及模型

将一个用户的信息传送给另一个用户的全部设施通常称为通信系统，其中主要包括把信源信息转换成可以在信道中传送的信号的发送端机、传送信号所需的线路及附属设施(也就是信道)以及把信号转换成用户信息的接收端机。光纤通信系统是由光发送机、光接收机、光纤