



高等学校电子与通信类专业“十一五”规划教材

# 光纤通信技术

主编 郭玉斌  
主审 李玉权



西安电子科技大学出版社  
<http://www.xduph.com>

高等学校电子与通信类专业“十一五”规划教材

# 光纤通信技术

主 编 郭玉彬

副主编 霍佳雨

主 审 李玉权



西安电子科技大学出版社

2008

## 内 容 简 介

本书主要阐述了光纤通信的原理及其发展和应用,光纤的传输理论和特性,光源、光发送机、光检测器和光接收机的工作原理和特性,光纤通信系统的构成、设计及光缆工程,并介绍了光电集成和光子集成、波长转换、无源光器件、全光放大器、相干光通信、光孤子通信、无线毫米波光纤通信、光波分复用、光时分复用、光码分复用、光频分复用、光空分复用和全光通信网等现代光纤通信新技术。

全书条理清晰,语言流畅,理论体系严谨,注重理论与实际的有机结合,力求全面系统地展示当代光纤通信的基本理论和最新技术全貌。本书可作为通信工程及相关专业高年级本科生、研究生的专业基础课教材,也可作为相关科研及工程技术人员的参考书。

★ 本书配有电子教案,需要者可登录出版社网站,免费下载。

## 图书在版编目(CIP)数据

光纤通信技术/郭玉彬主编. —西安:西安电子科技大学出版社,2008.9

高等学校电子与通信类专业“十一五”规划教材

ISBN 978-7-5606-2089-3

I. 光… II. 郭… III. 光纤通信—高等学校—教材 IV. TN929.11

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 108189 号

策 划 曹 朕

责任编辑 曹 朕

出版发行 西安电子科技大学出版社(西安市太白南路2号)

电 话 (029)88242885 88201467 邮 编 710071

http://www.xduph.com E-mail: xdupfxb001@163.com

经 销 新华书店

印刷单位 西安文化彩印厂

版 次 2008年9月第1版 2008年9月第1次印刷

开 本 787毫米×1092毫米 1/16 印 张 21.5

字 数 505千字

印 数 1~4000册

定 价 33.00元

ISBN 978-7-5606-2089-3/TN·0447

XDUP 2381001-1

\*\*\* 如有印装问题可调换 \*\*\*

## 内 容 简 介

本书主要阐述了光纤通信的原理及其发展和应用, 光纤的传输理论和特性, 光源、光发送机、光检测器和光接收机的工作原理和特性, 光纤通信系统的构成、设计及光缆工程, 并介绍了光电集成和光子集成、波长转换、无源光器件、全光放大器、相干光通信、光孤子通信、无线毫米波光纤通信、光波分复用、光时分复用、光码分复用、光频分复用、光空分复用和全光通信网等现代光纤通信新技术。

全书条理清晰, 语言流畅, 理论体系严谨, 注重理论与实际的有机结合, 力求全面系统地展示当代光纤通信的基本理论和最新技术全貌。本书可作为通信工程及相关专业高年级本科生、研究生的专业基础课教材, 也可作为相关科研及工程技术人员的参考书。

★ 本书配有电子教案, 需要者可登录出版社网站, 免费下载。

## 图书在版编目(CIP)数据

光纤通信技术/郭玉彬主编. —西安: 西安电子科技大学出版社, 2008.9

高等学校电子与通信类专业“十一五”规划教材

ISBN 978-7-5606-2089-3

I. 光… II. 郭… III. 光纤通信—高等学校—教材 IV. TN929.11

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 108189 号

策 划 曹 朕

责任编辑 曹 朕

出版发行 西安电子科技大学出版社(西安市太白南路2号)

电 话 (029)88242885 88201467 邮 编 710071

http://www.xduph.com E-mail: xdupfxb001@163.com

经 销 新华书店

印刷单位 西安文化彩印厂

版 次 2008年9月第1版 2008年9月第1次印刷

开 本 787毫米×1092毫米 1/16 印 张 21.5

字 数 505千字

印 数 1~4000册

定 价 33.00元

ISBN 978-7-5606-2089-3/TN·0447

XDUP 2381001-1

\*\*\* 如有印装问题可调换 \*\*\*

**西安电子科技大学出版社**  
**高等学校电子与通信类专业“十一五”规划教材**  
**编审专家委员会名单**

**主任:** 杨 震 (南京邮电大学校长、教授)

**副主任:** 张德民 (重庆邮电大学通信与信息工程学院副院长、教授)

秦会斌 (杭州电子科技大学电子信息学院院长、教授)

**通信工程组**

**组 长:** 张德民 (兼)

**成 员:** (成员按姓氏笔画排列)

王 晖 (深圳大学信息工程学院副院长、教授)

巨永锋 (长安大学信息工程学院副院长、教授)

成际镇 (南京邮电大学通信与信息工程学院副院长、副教授)

刘顺兰 (杭州电子科技大学通信工程学院副院长、教授)

李白萍 (西安科技大学通信与信息工程学院副院长、教授)

张邦宁 (解放军理工大学通信工程学院卫星系系主任、教授)

张瑞林 (浙江理工大学信息电子学院院长、教授)

张常年 (北方工业大学信息工程学院院长、教授)

范九伦 (西安邮电学院信息与控制系系主任、教授)

姜 兴 (桂林电子科技大学信息与通信学院副院长、教授)

姚远程 (西南科技大学信息工程学院副院长、教授)

康 健 (吉林大学通信工程学院副院长、教授)

葛利嘉 (中国人民解放军重庆通信学院军事信息工程系系主任、教授)

**电子信息工程组**

**组 长:** 秦会斌 (兼)

**成 员:** (成员按姓氏笔画排列)

王 荣 (解放军理工大学通信工程学院电信工程系系主任、教授)

朱宁一 (解放军理工大学理学院基础电子学系系主任、工程师)

李国民 (西安科技大学通信与信息工程学院院长、教授)

李邓化 (北京信息工程学院信息与通信工程系系主任、教授)

吴 谨 (武汉科技大学信息科学与工程学院电子系系主任、教授)

杨马英 (浙江工业大学信息工程学院副院长、教授)

杨瑞霞 (河北工业大学信息工程学院院长、教授)

张雪英 (太原理工大学信息工程学院副院长、教授)

张 彤 (吉林大学电子科学与工程学院副院长、教授)

张焕君 (沈阳理工大学信息科学与工程学院副院长、副教授)

陈鹤鸣 (南京邮电大学光电学院院长、教授)

周 杰 (南京信息工程大学电子与信息工程学院副院长、教授)

欧阳征标 (深圳大学电子科学与技术学院副院长、教授)

雷 加 (桂林电子科技大学电子工程学院副院长、教授)

**项目策划:** 毛红兵

**策 划:** 曹 昉 寇向宏 杨 英 郭 景

# 前 言

近 20 年来, 光纤从一个研究热点迅速发展为强大的商业应用领域, 光纤通信已成为目前信息通信学科中具有特色和广阔发展前景的新兴技术之一。国际上, 高速大容量光通信技术主流的波分复用光纤通信技术及代表未来光通信技术发展方向的全光通信技术正迅速朝着远距离、高速度、大容量、全光化和网络化方向发展和普及。本书正是介绍其从入门理论到中级知识的专业基础性教材。

本书共分 11 章, 第 1 章介绍光纤通信的基本概念、技术特点和发展背景; 第 2 章介绍光纤的组成、分类、导光原理、特性分析、光纤的传输理论及光纤光缆的基本知识; 第 3 章和第 4 章分别介绍光源、光发送机、光检测器和光接收机的工作原理和特性, 包括光源的种类、结构、性能指标, 光发送机的组成及其性能指标, 光检测器的工作机理和性能指标, 光接收机的结构和性能指标等; 第 5 章介绍常用无源光器件的工作原理、结构和工作特性; 第 6 章介绍模拟光纤通信系统和数字光纤通信系统的构成、设计及特性分析; 第 7 章和第 8 章分别介绍光放大器和光纤激光器的工作原理、结构和工作特性; 第 9 章对光波分复用、光时分复用、光码分复用、光频分复用和光空分复用等新型光复用技术的基本原理、分类及其特点作了系统性阐述; 第 10 章介绍光电集成和光子集成、光波长变换、相干光通信、光孤子通信、无线毫米波光纤通信和全光通信网等现代光纤通信新技术。第 11 章概述光纤通信测量技术, 并介绍了光功率计、光纤熔接机、光时域反射仪、光谱分析仪等常用光纤通信测量仪器的原理、结构及使用方法。

本书力求全面系统地介绍当代光纤通信的基本理论和最新技术, 书中列举了部分典型实例, 给出了必要的例题, 以帮助读者加深对基本理论和基本概念的理解。各章之后均附有一定量的具有针对性和启发性的习题。

本书在编写过程中得到解放军理工大学李玉权教授的悉心指导和帮助, 并得到吉林大学通信工程学院的大力协助, 张莹、蒋蒙菊、张树明参加了部分章节的编写工作, 在此一并表示诚挚的谢意!

由于作者水平有限, 书中难免会有不当之处, 敬请广大读者批评指正。

作 者

2008 年 3 月

# 目 录

|                         |    |
|-------------------------|----|
| 第 1 章 概述 .....          | 1  |
| 1.1 光纤通信的发展史 .....      | 1  |
| 1.2 光纤通信的特点 .....       | 2  |
| 1.3 光纤通信系统的结构 .....     | 4  |
| 1.4 光纤通信的发展趋势 .....     | 5  |
| 习题 .....                | 7  |
| 第 2 章 光纤和光缆 .....       | 8  |
| 2.1 光纤的结构和类型 .....      | 8  |
| 2.1.1 光纤的结构 .....       | 8  |
| 2.1.2 光纤的类型 .....       | 8  |
| 2.2 光纤的导光原理 .....       | 9  |
| 2.2.1 阶跃光纤中的导光原理 .....  | 9  |
| 2.2.2 梯度光纤中的光线分析 .....  | 12 |
| 2.3 光纤的波动理论 .....       | 16 |
| 2.3.1 麦克斯韦方程及波动方程 ..... | 16 |
| 2.3.2 标量近似解法 .....      | 18 |
| 2.3.3 线偏振模及其特性 .....    | 23 |
| 2.4 单模光纤 .....          | 25 |
| 2.4.1 单模光纤的传输特性 .....   | 26 |
| 2.4.2 单模光纤的双折射 .....    | 27 |
| 2.4.3 保偏光纤 .....        | 29 |
| 2.5 光纤的传输特性 .....       | 30 |
| 2.5.1 损耗特性 .....        | 30 |
| 2.5.2 色散 .....          | 33 |
| 2.5.3 光纤的传输带宽 .....     | 36 |
| 2.5.4 非线性光学效应 .....     | 37 |
| 2.6 光纤制造工艺 .....        | 39 |
| 2.7 单模光纤的进展 .....       | 41 |
| 2.8 光缆 .....            | 44 |
| 2.8.1 光缆的结构 .....       | 44 |
| 2.8.2 光缆的分类 .....       | 45 |
| 习题 .....                | 47 |
| 第 3 章 光源和光发射机 .....     | 49 |
| 3.1 光发射和光吸收 .....       | 49 |
| 3.1.1 光和物质的相互作用 .....   | 49 |

|                                |           |
|--------------------------------|-----------|
| 3.1.2 激光器的工作原理 .....           | 52        |
| 3.2 实用化光通信系统对光源的基本要求 .....     | 53        |
| 3.3 半导体发光二极管(LED) .....        | 54        |
| 3.3.1 工作原理 .....               | 54        |
| 3.3.2 结构和分类 .....              | 54        |
| 3.3.3 发光二极管的特性 .....           | 55        |
| 3.4 半导体激光器(LD) .....           | 57        |
| 3.4.1 半导体激光器的工作原理 .....        | 57        |
| 3.4.2 半导体激光器的基本结构 .....        | 63        |
| 3.4.3 半导体激光器的主要特性 .....        | 64        |
| 3.5 实用化 LD 与 LED 参数典型值对比 ..... | 67        |
| 3.6 单纵模半导体激光器 .....            | 69        |
| 3.6.1 分布反馈式激光器 .....           | 69        |
| 3.6.2 耦合腔半导体激光器 .....          | 71        |
| 3.6.3 量子阱激光器(MQW) .....        | 72        |
| 3.7 光发射机 .....                 | 72        |
| 3.7.1 光源调制原理 .....             | 72        |
| 3.7.2 光发射机的构成及指标 .....         | 75        |
| 3.7.3 光源的驱动电路 .....            | 76        |
| 习题 .....                       | 78        |
| <b>第 4 章 光检测器和光接收机</b> .....   | <b>80</b> |
| 4.1 光检测器 .....                 | 80        |
| 4.1.1 工作原理 .....               | 80        |
| 4.1.2 主要工作特性 .....             | 81        |
| 4.2 光检测器的分类 .....              | 83        |
| 4.3 PIN 光电二极管 .....            | 84        |
| 4.3.1 PIN 结构及工作原理 .....        | 84        |
| 4.3.2 PIN 的特性 .....            | 85        |
| 4.4 雪崩光电二极管(APD) .....         | 86        |
| 4.4.1 雪崩光电二极管的雪崩倍增效应 .....     | 87        |
| 4.4.2 雪崩光电二极管的结构 .....         | 87        |
| 4.4.3 雪崩光电二极管的特性 .....         | 88        |
| 4.5 MSM 光检测器 .....             | 91        |
| 4.6 光检测器的可靠性和注意事项 .....        | 91        |
| 4.6.1 光检测器的可靠性 .....           | 91        |
| 4.6.2 光检测器使用中的注意事项 .....       | 92        |
| 4.7 IM/DD 模式 .....             | 92        |
| 4.7.1 IM/DD 模式概述 .....         | 92        |
| 4.7.2 IM/DD 模式框图 .....         | 93        |
| 4.8 光接收机 .....                 | 94        |
| 4.8.1 光接收机基本组成 .....           | 94        |
| 4.8.2 光接收机的噪声分析 .....          | 98        |

|            |                  |            |
|------------|------------------|------------|
| 4.8.3      | 光接收机的误码率         | 101        |
| 4.8.4      | 光接收机的灵敏度         | 105        |
| 4.8.5      | 光接收机的动态范围        | 108        |
|            | 习题               | 109        |
| <b>第5章</b> | <b>无源光器件</b>     | <b>110</b> |
| 5.1        | 光纤耦合器            | 110        |
| 5.1.1      | 光耦合器的拓扑结构        | 110        |
| 5.1.2      | 全光纤耦合器           | 112        |
| 5.1.3      | 塑料光纤耦合器          | 113        |
| 5.1.4      | 光纤耦合器的性能指标       | 114        |
| 5.2        | 光波分复用器和解复用器      | 116        |
| 5.2.1      | 结构原理             | 116        |
| 5.2.2      | 解复用器的类型          | 116        |
| 5.2.3      | 光波分复用器/解复用器的光学特性 | 120        |
| 5.3        | 光衰减器             | 121        |
| 5.3.1      | 光衰减器的分类          | 122        |
| 5.3.2      | 光衰减器的应用          | 126        |
| 5.3.3      | 光衰减器的发展趋势        | 126        |
| 5.4        | 光开关              | 127        |
| 5.4.1      | 光开关的应用           | 127        |
| 5.4.2      | 光开关的分类           | 128        |
| 5.4.3      | 光开关的特性参数         | 133        |
| 5.5        | 光隔离器             | 134        |
| 5.5.1      | 偏振相关型光隔离器        | 135        |
| 5.5.2      | 偏振无关型光隔离器        | 135        |
| 5.5.3      | 光隔离器的应用          | 137        |
| 5.6        | 光纤连接器            | 137        |
| 5.6.1      | 光纤连接器的损耗         | 138        |
| 5.6.2      | 光纤连接器的性能         | 140        |
| 5.6.3      | 常用的光纤连接器         | 142        |
| 5.7        | 光纤光栅             | 144        |
| 5.7.1      | 光纤光栅的发展          | 144        |
| 5.7.2      | 光纤光栅的分类及应用       | 145        |
| 5.7.3      | 光纤布拉格光栅          | 146        |
| 5.7.4      | 光纤布拉格光栅的基本特性     | 147        |
| 5.7.5      | 光纤光栅制作方法         | 149        |
| 5.8        | 光环行器             | 151        |
| 5.8.1      | 光环行器的结构          | 151        |
| 5.8.2      | 光环行器的性能指标        | 151        |
|            | 习题               | 152        |
| <b>第6章</b> | <b>光纤通信系统</b>    | <b>153</b> |
| 6.1        | 模拟光纤通信系统         | 153        |

|            |                   |            |
|------------|-------------------|------------|
| 6.1.1      | 模拟光纤通信系统的基本原理     | 153        |
| 6.1.2      | 模拟光纤通信系统的主要性能指标   | 159        |
| 6.2        | 数字光纤通信系统          | 164        |
| 6.2.1      | 数字光纤通信系统概述        | 164        |
| 6.2.2      | 数字光纤通信系统的体制       | 164        |
| 6.2.3      | 数字光纤通信系统的基本结构     | 173        |
| 6.2.4      | 数字光纤通信系统的码型       | 175        |
| 6.2.5      | 数字光纤通信系统的主要性能指标   | 179        |
| 6.3        | 系统设计              | 183        |
| 6.3.1      | 系统的总体考虑           | 183        |
| 6.3.2      | 系统部件的选择           | 184        |
| 6.3.3      | 功率预算和色散预算         | 185        |
|            | 习题                | 189        |
| <b>第7章</b> | <b>光放大器</b>       | <b>190</b> |
| 7.1        | 光放大器概述            | 190        |
| 7.1.1      | 光放大器的发展           | 190        |
| 7.1.2      | 光放大器的分类           | 190        |
| 7.1.3      | 光放大器的主要指标         | 191        |
| 7.1.4      | 光放大器的应用           | 193        |
| 7.2        | 掺铒光纤放大器(EDFA)     | 194        |
| 7.2.1      | EDFA 的工作原理        | 194        |
| 7.2.2      | EDFA 的结构          | 196        |
| 7.2.3      | EDFA 的主要指标        | 197        |
| 7.2.4      | EDFA 的特点          | 202        |
| 7.2.5      | EDFA 的系统应用        | 202        |
| 7.3        | 铒/镱共掺光纤放大器(YEDFA) | 203        |
| 7.3.1      | YEDFA 的工作原理       | 204        |
| 7.3.2      | YEDFA 的掺杂浓度       | 205        |
| 7.4        | 光纤拉曼放大器(FRA)      | 205        |
| 7.4.1      | FRA 的组成和特点        | 205        |
| 7.4.2      | FRA 的工作原理         | 206        |
| 7.4.3      | FRA 的特性           | 208        |
| 7.4.4      | FRA 的应用           | 210        |
| 7.5        | 光纤布里渊放大器(FBA)     | 211        |
| 7.5.1      | FBA 的工作原理         | 211        |
| 7.5.2      | FBA 的应用           | 211        |
| 7.6        | 半导体光放大器(SOA)      | 212        |
| 7.6.1      | SOA 的工作原理         | 212        |
| 7.6.2      | SOA 的特性           | 212        |
| 7.6.3      | SOA 的应用           | 215        |
| 7.7        | 两种主要光放大器的比较       | 216        |
|            | 习题                | 217        |

|                       |     |
|-----------------------|-----|
| <b>第 8 章 光纤激光器</b>    | 218 |
| 8.1 光纤激光器的发展简史        | 218 |
| 8.2 光纤激光器基本原理及特点      | 219 |
| 8.2.1 光纤激光器的基本原理      | 219 |
| 8.2.2 光纤激光器的特点        | 220 |
| 8.3 光纤激光器的分类          | 221 |
| 8.3.1 稀土类掺杂光纤激光器      | 224 |
| 8.3.2 光纤受激拉曼散射激光器     | 225 |
| 8.3.3 光纤光栅激光器         | 225 |
| 8.3.4 上转换光纤激光器        | 225 |
| 8.4 光纤激光器发展前景         | 226 |
| 8.4.1 几种高性能的光纤激光器     | 226 |
| 8.4.2 光纤激光器的发展方向      | 227 |
| 习题                    | 228 |
| <b>第 9 章 光复用技术</b>    | 229 |
| 9.1 光复用技术的基本概念        | 229 |
| 9.2 光时分复用(OTDM)技术     | 231 |
| 9.2.1 OTDM 的复用原理      | 231 |
| 9.2.2 OTDM 的解复用原理     | 233 |
| 9.2.3 OTDM 的关键技术      | 235 |
| 9.3 光码分复用(OCDM)技术     | 236 |
| 9.3.1 OCDM 的基本原理      | 237 |
| 9.3.2 OCDM 的编码技术      | 237 |
| 9.3.3 OCDM 的优点        | 239 |
| 9.4 光频分复用(OFDM)技术     | 239 |
| 9.4.1 OFDM 的基本原理      | 239 |
| 9.4.2 OFDM 的关键技术      | 241 |
| 9.4.3 OFDM 的应用        | 242 |
| 9.5 光空分复用技术           | 243 |
| 9.6 光波分复用技术           | 243 |
| 9.6.1 光波分复用原理         | 244 |
| 9.6.2 光波分复用系统的构成      | 244 |
| 9.6.3 光波分复用技术的主要特点    | 247 |
| 9.6.4 光波分复用系统的技术分类    | 248 |
| 9.6.5 光分插复用器          | 251 |
| 9.6.6 WDM 技术规范        | 255 |
| 习题                    | 262 |
| <b>第 10 章 光纤通信新技术</b> | 263 |
| 10.1 全光通信网            | 263 |
| 10.1.1 全光通信网的概念、结构和特点 | 263 |
| 10.1.2 全光通信网的关键技术     | 264 |
| 10.1.3 光纤接入网技术        | 269 |

|                                 |     |
|---------------------------------|-----|
| 10.2 相干光通信 .....                | 276 |
| 10.2.1 相干光通信的基本原理 .....         | 276 |
| 10.2.2 相干光通信系统的组成 .....         | 279 |
| 10.2.3 相干光通信的关键技术 .....         | 281 |
| 10.2.4 相干光通信的优点及其应用 .....       | 282 |
| 10.3 光孤子通信技术 .....              | 283 |
| 10.3.1 光孤子通信的基本原理 .....         | 283 |
| 10.3.2 光孤子通信系统的基本组成 .....       | 290 |
| 10.3.3 光孤子通信中的关键技术 .....        | 290 |
| 10.3.4 光孤子通信的优点及前景 .....        | 296 |
| 10.4 波长转换技术 .....               | 296 |
| 10.4.1 波长转换技术的基本概念 .....        | 296 |
| 10.4.2 波长转换技术类型 .....           | 297 |
| 10.4.3 全光波长转换技术 .....           | 299 |
| 10.5 无线毫米波光纤通信(ROF) .....       | 305 |
| 10.5.1 无线通信系统现状 .....           | 305 |
| 10.5.2 ROF 技术简介 .....           | 306 |
| 10.5.3 ROF 技术特点 .....           | 307 |
| 10.5.4 ROF 系统线路结构 .....         | 309 |
| 10.5.5 ROF 的关键技术 .....          | 311 |
| 10.5.6 ROF 技术的应用 .....          | 312 |
| 10.6 光电集成和光子集成 .....            | 313 |
| 10.6.1 光集成的应用 .....             | 314 |
| 10.6.2 OEIC 和 PIC 器件的材料技术 ..... | 314 |
| 10.6.3 OEIC 器件的结构 .....         | 315 |
| 10.6.4 主要 OEIC 器件 .....         | 316 |
| 10.6.5 PIC 器件 .....             | 317 |
| 习题 .....                        | 317 |
| <b>第 11 章 光纤通信测量技术</b> .....    | 319 |
| 11.1 光纤参数的测量 .....              | 319 |
| 11.1.1 光纤损耗的测量 .....            | 319 |
| 11.1.2 光纤模场直径的测量 .....          | 320 |
| 11.1.3 色散的测量 .....              | 320 |
| 11.1.4 光纤带宽的测量 .....            | 321 |
| 11.2 光纤通信中的常用仪器 .....           | 323 |
| 11.2.1 光功率计 .....               | 323 |
| 11.2.2 光纤熔接机 .....              | 324 |
| 11.2.3 光时域反射仪 .....             | 326 |
| 11.2.4 光谱分析仪 .....              | 327 |
| 习题 .....                        | 328 |
| <b>参考文献</b> .....               | 329 |

# 第1章 概述

## 1.1 光纤通信的发展史

光纤是现代化通信网中重要的信息传输媒质。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,引起了人们的极大兴趣和关注,在短短的20多年中取得了迅速的发展。

利用光作为信息传送手段,可以追溯到古代的烽火台,自17世纪以来沿用的灯光传送信号及手旗通信在广义上也属于光信息传递,当然,从近代通信的角度来看,这些都不能算是真正的光通信。甚至A. G. 贝尔在1880年做的光电话实验,也与现代的光通信有很大的区别。

1966年,出生在中国上海的英籍华人高锟发表论文《光频介质纤维表面波导》,提出用石英玻璃纤维(光纤)传送光信号来进行通信,可实现长距离、大容量通信,这奠定了现代光通信——光纤通信的基础。同时,高锟等人在分析了造成光纤传输损耗较高的主要原因后指出,如能完全除去玻璃中的杂质,损耗就可降到20 dB/km,相当于同轴电缆的水平,那么,光纤就可用来进行光通信。1970年,美国康宁公司生产出了20 dB/km的低损耗光纤,1973年,美国贝尔(Bell)实验室取得了更大成绩,光纤损耗降低到2.5 dB/km,1974年降低到1.1 dB/km。1976年,日本电报电话(NTT)公司等单位将光纤损耗降低到0.47 dB/km。在之后的10年中,波长为1550 nm的光纤损耗由1979年的0.20 dB/km降到1984年的0.157 dB/km,1986年又降至0.154 dB/km,接近了光纤最低损耗的理论极限。

在光纤损耗不断降低的同时,光源的发展也十分迅速。激光器诞生于1960年,它可以输出频率稳定、相位稳定,并具有高亮度的光束。这种激光束可用作载波源,从而揭开了光通信的序幕。1970年,作为光纤通信用的光源也取得了实质性的进展,美国贝尔实验室研制成功室温下连续振荡的半导体激光器,与气体激光器比较,它体积小,耗电少,能直接用电流高速调制,使用方便。目前,在通信方面以采用镓铝砷(GaAlAs)和铟镓砷磷(In-GaAsP)材料的半导体激光器为主流,先进的分布反馈式(DFB)半导体激光器及量子阱(QW)激光器也已经得到实用。

1974年前后,许多国家进行了各种室内的光纤通信传输实验,1976年后出现了各种实用的光纤通信系统,1980年,美国电报电话公司的45 Mb/s光纤通信系统FT-3实现商用。20世纪80年代光纤通信进入了高速发展的时期,经历了从短波长到长波长,从多模光纤到单模光纤,从低速率到高速率的发展过程。目前,全世界已敷设的光缆总长已达几千万公里(我国亦敷设了数十万公里),形成了遍布全世界的陆地及海底光纤网。2.5~10 Gb/s的系统均已实用化并大量应用,40 Gb/s的超高速光纤通信技术进展亦十分迅速。

自从 1966 年高锟提出以光纤作为传输介质的概念以来,光纤通信从研究到应用发展非常迅速,技术上不断更新换代,通信能力(传输速率和中继距离)不断提高,应用范围不断扩大。光纤通信的发展可以粗略地分为四个阶段。

第一阶段(1966~1976 年)是从基础研究到商业应用的开发时期。在这个时期,出现了短波长(850 nm)低速率(45 或 34 Mb/s)多模光纤通信系统,无中继传输距离约 10 km。

第二阶段(1976~1986 年)是以提高传输速率和增加传输距离为研究目标和大力推广应用的大发展时期。在这个时期,光纤从多模发展到单模,工作波长从短波长(850 nm)发展到长波长(1310 nm 和 1550 nm),实现了工作波长为 1310 nm、传输速率为 140~565 Mb/s 的单模光纤通信系统,无中继传输距离为 50~100 km。

第三阶段(1986~1996 年)是以超大容量超长距离为目标、全面深入开展新技术研究的时期。在这个时期,出现了 1550 nm 色散位移单模光纤通信系统。采用外调制技术,传输速率可达 2.5~10 Gb/s,无中继传输距离可达 100~150 km,实验室可以达到更高水平。

第四阶段(1996 年至今)是采用光放大器、波分复用光纤通信系统和超长距离的光孤子通信系统的时期。

## 1.2 光纤通信的特点

任何通信系统追求的最终技术目标都是要可靠地实现最大可能的信息传输容量和传输距离。通信系统的传输容量取决于对载波调制的频带宽度,载波频率越高,频带宽度越宽。通信技术发展的历史,实际上是一个不断提高载波频率和增加传输容量的历史。20 世纪 60 年代,微波通信技术已经成熟,因此开拓频率更高的光波应用,就成为通信技术发展的必然。电缆通信和微波通信的载波是电波,光纤通信的载波是光波。虽然光波和电波都是电磁波,但是频率差别很大。光波的波长在微米级,相对应的频率非常高(约为  $10^{14} \sim 10^{15}$  Hz),因而它特别适于作宽带信号的载频。而作为传输介质的光纤又比同轴电缆或波导管的损耗低得多,因此相对于电缆通信或微波通信,光纤通信具有许多独特的优点。

(1) 容许频带很宽,传输容量很大。光是频率极高的电磁波,以它作为信号的载体可传输极宽的信号频谱。在光纤中传输的激光,波长范围为  $0.75 \sim 2.5 \mu\text{m}$ ,频率约为  $3 \times 10^{14}$  Hz。若以其 1/10 作为传输频带,则可传约  $10^{10}$  路电话。因此光纤在单位面积上有极大的信号传输能力,即单位面积上的信息密度极高,传输容量极大。

光纤通信系统的传输容量取决于光纤特性、光源特性和调制特性。光纤通信系统中通常使用的是  $\text{SiO}_2$  材料的光纤。根据  $\text{SiO}_2$  光纤的损耗和波长特性曲线,单模光纤有着极宽的频带宽度。石英单模光纤在 1310 nm 波长具有零色散特性,通过光纤的设计,还可以把零色散波长移到 1550 nm。在零色散波长窗口,单模光纤都具有很高的带宽。

在一根光缆中可以容纳几百根至几千根光纤的带状光缆早已实现,使线路传输容量成百倍、千倍地增加。就单根光纤而言,采用波分复用技术(WDM)或频分复用技术(FDM),采用外调制方式等都是增加光纤通信系统传输容量的有效办法。

(2) 传输损耗小,中继距离长。由于传输介质对光的吸收和散射,光纤总有一定的损耗存在,使得光信号通过光纤传输后变得越来越弱。由于技术和制作工艺的进步,目前已

使光纤损耗降得很低,单模光纤在 1310 nm 波长窗口损耗为 0.35 dB/km,1550 nm 波长窗口损耗为 0.2 dB/km,而且在相当宽的频带内各频率的损耗几乎一样,因此用光纤比用同轴电缆或波导管的中继距离长得多。波长为 1550 nm 的色散位移单模光纤通信系统,若传输速率为 2.5 Gb/s,则中继距离可达 150 km;若传输速率为 10 Gb/s,则中继距离可达 100 km。

由于目前光纤的损耗降得越来越低,以至于光纤的损耗已不再是阻碍中继距离加长的关键因素,因此,许多中继距离受光纤损耗限制的光纤通信系统现已变成受光纤带宽限制的光纤通信系统了。因为受光纤带宽限制,光脉冲会变宽。当传送数据速率高时,脉冲之间间隔很小,若在传输过程中因为受光纤带宽的限制而使脉冲宽度变宽,会导致前后脉冲无法分辨。在这种情况下,即便光纤损耗再低,到达终点的脉冲幅度再大,也无法进行分辨,这就是受光纤带宽所限制的光纤通信系统。因此,为了增大中继距离,降低光纤损耗和扩展光纤带宽两者是缺一不可的。

(3) 保密性好,不易被窃听。由于在传输过程中光纤是将光信号束缚在光纤芯内传播的,光信号向外辐射,泄漏极小,光纤之间串音很小,在信息传送中很难被窃听,所以光纤通信保密性很好。这在国防、军事、经济上都有重要意义。

(4) 节省大量有色金属。制造普通的电缆需要消耗大量的铜和铅等有色金属。以四管中同轴电缆为例,1 km 四管中同轴电缆约需 460 kg 铜,而制造 1 km 光纤,只需几十克石英。而且制造光纤的石英( $\text{SiO}_2$ )丰富而便宜,取之不竭。

(5) 抗电磁干扰性能好。光纤由  $\text{SiO}_2$  材料制成,它不受各种电磁场的干扰。强电、雷击等也不会影响光纤的传输性能。甚至在核辐射的环境中,光纤通信仍能正常进行,这是通常的电缆通信所不能比拟的。因此,光纤通信在电力输配、电气化铁路、雷击多发地区、核试验等环境中应用更能体现其优越性。

(6) 重量轻,安全,易敷设。光缆的安装和维护比较安全、简单,这是因为:首先,玻璃或塑料都不导电,没有电流通过或电压的干扰;其次,它可以在易挥发的液体和气体周围使用而不必担心会引起爆炸或起火;最后,它比相应的金属电缆体积小,重量轻,更便于机载工作,而且它占用的存储空间小,运输也方便。通信设备的重量轻、体积小,对军事、航空和宇宙飞船等方面的应用具有特别重要的意义。

(7) 适应环境。光纤对恶劣环境有较强的适应能力。它比金属电缆更能适应温度的变化,而且腐蚀性的液体或气体对其影响较小。

(8) 寿命长。尽管还没有得到证实,但可以断言,光纤通信系统远比金属设施的使用寿命长,因为光缆具有更强的适应环境变化和抗腐蚀的能力。

总之,光纤通信不仅在技术上具有很大的优越性,而且在经济上亦具有巨大的竞争能力,因此在通信领域中将发挥越来越重要的作用。

当然光纤系统也存在一些不足:

(1) 接口昂贵。在实际使用中,需要昂贵的接口器件将光纤接到标准的电子设备上。

(2) 强度差。因为光缆本身与同轴电缆相比抗拉强度要低得多。

(3) 不能传送电力。有时需要为远处的接口或再生的设备提供电能,光缆显然不能胜任,在光缆系统中还必须额外使用金属电缆。

(4) 需要专用的工具、设备以及培训。需要使用专用工具完成光纤的焊接以及维修;

需要专用测试设备进行常规测量；光缆的维修既复杂又昂贵，从事光缆工作的技术人员需要通过相应的技术培训并掌握一定的专业技能。

### 1.3 光纤通信系统的结构

根据不同的用户要求、不同的业务种类以及不同阶段技术水平的发展情况，光纤通信系统的形式多种多样。如图 1-3-1 所示为光纤通信系统链路的简化框图。通信链路中最基本的三个组成部分是光发射机、光接收机和光纤链路。

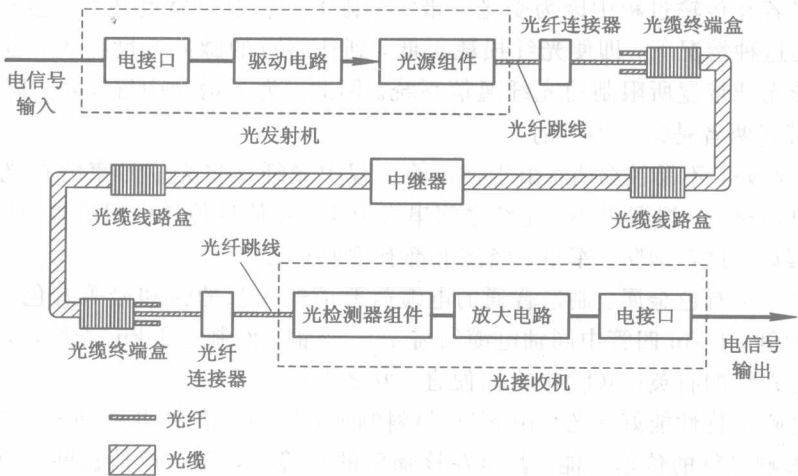


图 1-3-1 光纤通信系统链路

光发射机由模拟或数字电接口、电压-电流驱动、光源和光源与光纤之间的耦合接口等组成。光纤是高纯度的玻璃或塑料光纤，长距离大容量的光纤链路普遍采用玻璃光纤，低速率短距离的传输系统可以采用塑料光纤。光接收机包括光纤与光检测器之间的耦合器件、光检测器、电流-电压转换器、放大器和模拟或数字电接口等。

#### 1. 光发射机

在光发射机中，光源可由数字信号或模拟信号调制。对于模拟调制，要求输入接口阻抗匹配并限制输入信号的振幅，模拟信号应先转变成数字脉冲流，故输入接口还应包含模/数转换器。电压-电流驱动是输入电路与光源间的电接口。发射机中的光源是半导体发光二极管(LED)或注入式半导体激光二极管(ILD)，简称 LD。这两种二极管的光功率与驱动电流成正比。因此，电压-电流驱动电路是用来将输入信号的电压转换为电流以驱动光源的。光源-光纤耦合器是一种机械式接口，它的作用是把光源发出的光耦合到光纤或光缆中，光缆由玻璃光纤或塑料光纤、护套和外套管组成。

#### 2. 光接收机

光接收机的功能是把从光纤链路输出的微弱光信号转换为电信号，并经放大和处理后恢复成发射前的电信号。光接收机由光检测器、放大器和相关电路组成，其中光检测器是光接收机的核心。对光检测器的要求是响应度高、噪声低和响应速度快。目前广泛使用的光检测器有两种类型：光电二极管(PIN)和雪崩光电二极管(APD)。二者都能将光能转化

为电流,然后再通过电流-电压转换器变成输出电压信号。

光纤-光检波器的耦合器件也是一种机械接口,其作用是把光缆中的光尽可能多地耦合到光检测器中。目前在实际的系统中,都是将光源、光源与光纤的接口和一段光纤封装在一起,形成光源组件,这样就增加了系统的可靠性。同样,将光纤、光纤与光检测器之间的接口和光检测器封装在一起,就形成光检测器组件。

光接收机输出端的模拟或数字电接口是一种电接口。该接口对输出电路起阻抗匹配和信号电平匹配的作用。

### 3. 光纤链路

光纤链路由光纤光缆、光纤光缆线路(接续)盒、中继器等构成,主要功能是把来自光发射机的光信号以尽可能小的失真和衰减传输到光接收机。光缆可以架空敷设,也可以敷设在管道内,或直埋于地下,或敷设于海底。由于制造、敷设等原因,光缆生产厂家生产的光缆一般为2 km一盘,因而如果光发送与光接收之间的距离超过2 km,每隔2 km将需要用光缆线路盒将光缆连接起来。光缆线路盒一般置于户外,因而要采取防潮、防腐等措施。光缆终端盒主要用于将光缆从户外引入到室内,将光缆中的光纤从光缆中分出来,一般放置在光设备机房内。光纤连接器主要用于将光发射机或光接收机与光缆终端盒分出的光纤连接起来,即连接光纤跳线与光缆中的光纤。

中继器主要用于补偿信号由于长距离传送所损失的能量。由于光纤的损耗和带宽限制了光波的传输距离,因此当光纤通信线路很长时,要求每隔一定的距离加入一个中继器,它与有线通信的增音机的作用相同。但应该指出,由于光纤损耗很低,因此光纤通信的中继距离要比有线通信,甚至微波通信大得多。目前,2.5 Gb/s单模光纤长波长通信系统的中继距离可达153 km,已达到微波通信中继距离的几倍,这就可以减少光纤通信线路的中继器数目,从而提高光纤通信的可靠性和经济效益。从光纤通信的意义来说,中继器应是光波的直接放大,但目前实用的光纤通信系统都是光-电转换型的中继器,即电中继器,它由光接收机和光发送机组成。光接收机首先接收从光纤中传来的被衰减的光信号,并将其变为电信号,然后对电信号进行放大,再用放大的电信号直接调制发送机中的光源产生已调光波,最后将光信号耦合进入光纤,达到光信号放大的目的。此种中继器设备比较复杂,而且因反复的光-电、电-光变换而增加了信号的失真。

随着光电器件制造技术的进一步发展,将光波直接放大已成为现实。现已研制成功各种类型的光放大器,可以对光直接放大。通过光纤传输后衰减的光信号可用光放大器直接放大并继续向前传输,以达到长距离通信的目的。目前,光放大器尤其是掺铒光纤放大器(EDFA)已在实际的光纤通信系统中被广泛使用。

## 1.4 光纤通信的发展趋势

光纤通信的诞生与发展是电信史上的一次重要革命。近几年来,随着技术的进步,电信管理体制的改革以及电信市场的逐步全面开放,光纤通信又一次呈现出蓬勃发展的新局面,目前光纤通信领域的主要发展热点有以下几个方面。

### 1. 新一代光纤

近几年来,随着IP业务量的爆炸式增长,传统的G.652单模光纤在适应上述超高速