

普通高等院校

电子信息类系列教材

*GuangXian  
TongXin YuanLi*

# 光纤通信原理 (第2版)

© 邓大鹏 等 编著

  
人民邮电出版社  
POSTS & TELECOM PRESS

普通高等院校电子信息类系列教材

# 光纤通信原理

(第2版)

邓大鹏 等 编著

人民邮电出版社

北京

## 图书在版编目 (CIP) 数据

光纤通信原理 / 邓大鹏等编著. —2版. —北京: 人民邮电出版社, 2009. 9  
(普通高等院校电子信息类系列教材)  
ISBN 978-7-115-20828-6

I. 光… II. 邓… 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 (2009) 第084463号

## 内 容 提 要

本书全面介绍了光纤通信的发展, 光纤的组成、导光原理, 光纤光缆的损耗特性、色散特性, 常用无源光器件的原理、结构和特性, 光源的种类、结构、工作原理, 光发送机的组成及特性, 光电探测器及光接收电路的工作原理和特性指标, 光放大器的工作原理、特性指标, 光同步数字传输网、光互联网、光接入网、智能交换光网络、全光网络, 常用光复用技术, 模拟光纤通信系统和数字光纤通信系统的构成、性能和系统设计, 以及相干光通信、光孤子通信等光通信新技术。

本书力求内容新颖, 难易适度, 深入浅出; 避免大篇幅深奥理论推导, 也不像科普读物过分简单, 注重理论性与实用性的结合。

本书可作为高等院校通信类专业的大专、本科学生的教材, 也可作为从事光纤通信的科研、生产、管理人员的培训教材或参考用书。

普通高等院校电子信息类系列教材

### 光纤通信原理 (第2版)

- 
- ◆ 编 著 邓大鹏 等  
责任编辑 滑 玉
  - ◆ 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>  
北京楠萍印刷有限公司印刷
  - ◆ 开本: 787×1092 1/16  
印张: 16.25  
字数: 393千字  
印数: 24 501 - 27 500册
- 2009年9月第2版  
2009年9月北京第1次印刷

---

ISBN 978-7-115-20828-6/TN

定价: 28.00元

读者服务热线: (010)67170985 印装质量热线: (010)67129223  
反盗版热线: (010)67171154

《光纤通信原理》第1版出版后，由于在内容的取舍、难易程度的掌控上较好地满足了读者的需求，因此深受广大读者的欢迎，5年里曾11次印刷。随着光纤通信的发展和光纤传送网络承载业务的多样化，光纤通信的主流技术也发生了不少变化，认为是电子瓶颈的电时分复用40Gbit/s速率的设备由实验室走进了商用，智能交换光网络（ASON）技术的标准也日趋成熟，EPON、GPON光纤接入技术应用范围也越来越广，光孤子通信也由梦想变为现实；5年里我们也收到了一些热心读者的建议：由于非光纤通信专业的学生，学校往往只开设一门光纤通信课程，希望教材中除光纤通信原理外，还应介绍像光网络一类时下应用非常广泛的光纤通信技术，改善学生的知识结构，更有利于学生了解光纤通信的应用，方便今后的工作；加之在多年的应用中我们也发现书中有一些不妥之处。因此，根据我们自己近几年学习、研究的情况和读者反馈的意见，摒弃原理与技术的严格界线，对本教材进行了一些修订。

这次修订的原则是保留第1版内容系统，条理清晰，难易适中的特点，力求修订后教材在内容上更新、更全面，与实际应用联系更为紧密。使之更适应在校通信工程专业学生和从事通信的工程技术人员的学习需要。读者通过本书的学习，能较系统地掌握光纤通信的基本原理，光纤通信的新技术、新器件，了解光纤通信的发展趋势。

修改后的教材增加了当前大量商用的光纤光栅、光隔离器、光环行器等新器件；光同步数字传输体制（SDH）的帧结构、映射复用过程、网元设备、网络结构及恢复保护机制；多业务传送平台（MSTP）的组成和技术特点；光互联网中的IP over SDH技术和IP over WDM技术的协议、帧格式及分层模型；光接入网中有望成为光纤到家主流技术的EPON和GPON的工作原理、网络结构和协议进展；能代表下一步光纤传送网发展方向的智能交换光网络的特点、体系结构、协议进展及关键技术；最后还对全光网的基本概念和核心技术作了简单介绍。

本书由邓大鹏、李卫、王英杰、解东宏、滕秀芳、杨富印、党利宏、张引发、谢小平编写与修订，全书由邓大鹏同志统稿。在本书的编写和修订过程中，得到了西安通信学院领导和同事的大力帮助，在此表示感谢。

由于光纤通信技术、器件、标准都发展很快，加之编者的学识有限，书中难免还存在一些缺点和错误，恳请广大读者批评指正。

编者  
2009年4月

# 目 录

<b>第 1 章 概述</b> .....	1	3.1.4 光纤损耗系数	53
1.1 光纤通信的发展与现状 .....	1	3.2 光纤的色散特性	54
1.1.1 早期的光通信 .....	1	3.2.1 色散的概念	54
1.1.2 光纤通信 .....	2	3.2.2 模式色散	54
1.2 光纤通信的主要特性 .....	4	3.2.3 材料色散	57
1.2.1 光纤通信的优点 .....	4	3.2.4 波导色散	59
1.2.2 光纤通信的缺点 .....	6	3.2.5 极化色散	60
1.3 光纤通信系统的组成和分类 .....	7	3.2.6 总色散	61
1.3.1 光纤通信系统的组成 .....	7	3.2.7 光纤的色散和带宽对通信 容量的影响	61
1.3.2 光纤通信系统的分类 .....	7	3.3 成缆对光纤特性的影响	64
复习思考题	8	3.3.1 光缆特性	64
<b>第 2 章 光纤和光缆</b> .....	9	3.3.2 成缆对光纤特性的影响	65
2.1 光纤的结构与类型 .....	9	3.4 典型光纤参数	66
2.1.1 光纤的结构 .....	9	小结	68
2.1.2 光纤的类型 .....	9	复习思考题	68
2.2 光纤的射线理论分析	12	<b>第 4 章 常用光无源器件</b> .....	70
2.2.1 基本光学定义和定律	12	4.1 光纤连接器	70
2.2.2 光纤中光的传播	13	4.1.1 光纤连接器的结构与种类	70
2.2.3 光纤中的模式传输	16	4.1.2 光纤连接器特性	74
2.2.4 多模光纤与单模光纤	18	4.2 光纤耦合器	74
2.3 均匀光纤的波动理论分析	20	4.2.1 光纤耦合器的结构与 原理	75
2.3.1 平面波在理想介质中的 传播	20	4.2.2 光纤耦合器的特性	78
2.3.2 阶跃光纤的波动理论	25	4.3 波分复用/解复用器	79
2.4 光缆	40	4.3.1 波分复用/解复用器的 原理与分类	80
2.4.1 光缆的典型结构	40	4.3.2 波分复用/解复用器的 特性	82
2.4.2 光缆的种类与型号	43	4.4 光开关	83
小结	46	4.4.1 光开关的种类	83
复习思考题	46	4.4.2 光开关的特性参数	86
<b>第 3 章 光纤的传输特性</b> .....	49	4.5 光纤光栅	87
3.1 光纤的损耗特性	49	4.5.1 光纤光栅原理	87
3.1.1 吸收损耗	49		
3.1.2 散射损耗	51		
3.1.3 弯曲损耗	52		

4.5.2 光纤光栅的特性与应用 ...	88	6.4 光接收机的噪声 .....	119
4.6 光隔离器及光环行器 .....	90	6.4.1 光接收机的噪声源 .....	119
4.6.1 光隔离器 .....	90	6.4.2 光接收机的信噪比 .....	121
4.6.2 光环行器 .....	92	6.5 光接收机的灵敏度 .....	121
小结 .....	93	6.5.1 数字光接收机的误码率 ...	121
复习思考题 .....	93	6.5.2 光接收机的灵敏度极限 ...	122
<b>第5章 光源与光发送机</b> .....	95	6.5.3 实际光接收机的灵敏度 ...	123
5.1 半导体光源的物理基础 .....	95	6.5.4 影响光接收机灵敏度的	
5.1.1 孤立原子的能级和半导体的		主要因素 .....	123
能带 .....	95	小结 .....	124
5.1.2 光与物质的相互作用 .....	96	复习思考题 .....	125
5.1.3 粒子数反转分布状态 .....	97	<b>第7章 光放大器</b> .....	126
5.2 半导体光源的工作原理 .....	97	7.1 光放大器概述 .....	126
5.2.1 发光二极管的工作原理 .....	97	7.1.1 光放大器在现代光纤通信	
5.2.2 激光二极管的工作原理 .....	99	系统中的应用 .....	126
5.3 光源的工作特性 .....	102	7.1.2 光放大器的发展史 .....	128
5.3.1 LED的工作特性 .....	102	7.1.3 光放大器的分类 .....	128
5.3.2 LD的工作特性 .....	103	7.1.4 光纤放大器的重要指标 ...	128
5.3.3 光源的主要技术指标及		7.2 掺铒光纤放大器 .....	130
简易检测 .....	105	7.2.1 掺铒光纤放大器的工作	
5.4 光发送机 .....	105	原理 .....	130
5.4.1 光调制原理 .....	106	7.2.2 掺铒光纤放大器的结构 ...	132
5.4.2 光发送机的构成及指标 ...	106	7.2.3 EDFA的重要指标 .....	133
5.5 驱动电路和辅助电路 .....	107	7.2.4 掺铒光纤放大器的系统	
5.5.1 驱动电路 .....	107	应用 .....	135
5.5.2 辅助电路 .....	108	7.2.5 掺铒光纤放大器的	
小结 .....	110	优缺点 .....	136
复习思考题 .....	110	7.3 光纤喇曼放大器 .....	137
<b>第6章 光电检测器与光接收机</b> .....	112	7.3.1 光纤喇曼放大器的工作	
6.1 光电检测器 .....	112	原理 .....	137
6.1.1 PIN光电二极管 .....	112	7.3.2 光纤喇曼放大器的结构 ...	138
6.1.2 雪崩光电二极管 .....	113	7.3.3 光纤喇曼放大器的性能 ...	139
6.2 光电检测器的特性指标 .....	114	7.3.4 光纤喇曼放大器的系统	
6.2.1 光电检测器的工作特性 ...	114	应用 .....	141
6.2.2 光电检测器的典型指标及		7.3.5 光纤喇曼放大器的	
简易检测 .....	116	优缺点 .....	142
6.3 光接收机 .....	117	7.4 其他光放大器 .....	143
6.3.1 光解调原理 .....	117	7.4.1 光纤布里渊放大器 .....	143
6.3.2 光接收机的构成与指标 ...	118	7.4.2 半导体光放大器 .....	143

7.4.3 掺铒波导光放大器 ..... 144

小结..... 144

复习思考题..... 144

**第8章 光复用技术** ..... 145

8.1 光复用技术的基本概念 ..... 145

8.2 光时分复用技术 ..... 148

8.2.1 比特交错光时分复用 ..... 149

8.2.2 分组交错光时分复用 ..... 150

8.3 密集波分复用技术 ..... 152

8.3.1 WDM 系统基本类型 ..... 153

8.3.2 WDM 系统基本结构与  
工作原理 ..... 156

8.4 密集波分复用系统的非线性  
串扰 ..... 157

8.4.1 受激喇曼散射串扰 ..... 158

8.4.2 受激布里渊散射串扰 ..... 159

8.4.3 自相位调制和交叉相位  
调制 ..... 160

8.4.4 四波混频 ..... 161

小结..... 162

复习思考题..... 162

**第9章 光网络** ..... 163

9.1 光同步数字传输网 ..... 163

9.1.1 同步数字体制基本概念 ..... 163

9.1.2 SDH 复用映射结构 ..... 166

9.1.3 SDH 网元设备 ..... 170

9.1.4 SDH 网络结构 ..... 173

9.1.5 多业务传送平台 ..... 176

9.2 光互联网 ..... 178

9.2.1 IP over SDH ..... 178

9.2.2 IP over WDM ..... 180

9.3 光接入网 ..... 183

9.3.1 EPON ..... 183

9.3.2 GPON ..... 185

9.4 智能交换光网络 ..... 187

9.4.1 智能交换光网络的  
概念 ..... 187

9.4.2 ASON 的体系结构 ..... 189

9.4.3 ASON 的控制平面  
及其核心技术 ..... 193

9.5 全光通信网 ..... 196

9.5.1 全光网概述 ..... 196

9.5.2 全光网关键技术 ..... 197

小结..... 203

复习思考题..... 203

**第10章 光纤通信系统设计** ..... 205

10.1 概述..... 205

10.2 模拟光纤通信系统..... 206

10.2.1 系统主要性能指标..... 206

10.2.2 传输距离设计..... 209

10.3 数字光纤通信系统..... 211

10.3.1 主要性能指标..... 211

10.3.2 系统设计..... 218

小结..... 228

复习思考题..... 228

**第11章 光纤通信新技术** ..... 230

11.1 相干光通信..... 230

11.1.1 相干光通信技术基本  
原理及发展..... 230

11.1.2 相干光通信关键技术..... 232

11.2 光孤子通信技术..... 234

11.2.1 光孤子通信技术的  
基本原理..... 234

11.2.2 光孤子通信技术的  
新进展..... 239

小结..... 243

复习思考题..... 243

附录 英文缩写..... 244

参考文献..... 250

3000 多年前人们就开始利用光进行通信,但光通信的真正飞跃是在光纤出现之后,由于光纤无可比拟的优越性,在短短的几十年中迅速地取代了电通信的地位,通信速率由几 Mbit/s,发展到单信道 10Gbit/s, 40Gbit/s。

本章主要介绍光纤通信的一些发展背景、基本概念和预备知识。

## 1.1 光纤通信的发展与现状

### 1.1.1 早期的光通信

几千年前,中国就有火光通信,它的设施叫烽火台。其中著名的有周朝的骊山烽火台,秦汉的长城烽火台。当时汉武帝大修万里长城,城上每隔五里设一个报警烽火台,一旦发现敌人入侵,白天燃烟,夜间举火,利用火光来传送军事情报。这种烽火台报警,就是古代的光通信方式。它也可以说是世界上最早利用光波通信的形式了。

烽火台报警虽然简陋,但它却包含着近代光通信的一些基本要素。首先,要有一个光源,烽火台报警用的光源就是烽火;其次,必须有接收器(在光纤通信中又称为光信号接收机),也就是要有能感受火光的装置,烽火台报警用的接收机就是人的眼睛;第三,必须设法把要传送的信息加在光波上,就是对光波进行调制,在烽火台通信中,被调制的火光信号只有两种状态:有火光或无火光;第四,必须有良好的光通道,烽火台报警,就是利用地球表面的大气作为天然的光通道。

到了 1880 年,贝尔发明了第一个光电话,这一大胆尝试,可以说是现代光通信的开端。

贝尔的光电话是以弧光灯作光源,发出的光投射在话筒的音膜上,当音膜按照说话人声音的强弱及音调的不同而作相应的振动时,从音膜上反射出来的光的强弱也随之变化。这种被声音信号所调制的光,通过大气传播一段距离后,被一个大型抛物面镜所接收,在该抛物面镜的焦点上放着一个硅光电池,它就是光探测器。硅光电池能将射在它上面的光转变成电信号,这个电信号的强弱及变化频率,都恰好能反映原来用于调制光信号的声音的强弱及频率。这个电信号被送进听筒,就能还原成原来的声音,完成了整个通信过程,如图 1-1 所示。



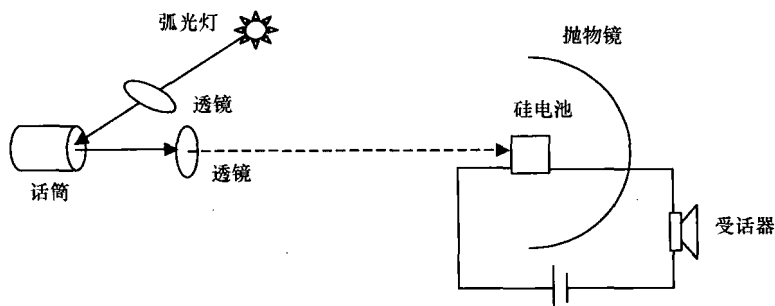


图 1-1 贝尔光电话系统

在这里，将弧光灯的恒定光束投射在话筒的音膜上，随声音的振动而得到强弱变化的反射光束，这个过程就是调制。而在接收端，载有信息的光射在硅光电池上，直接产生反映声音变化规律的光电流的过程就是解调。将这一电流送入听筒，从而恢复成声音信号，称为信息的再现。贝尔的光电话装置在晴天时通话距离可达数千米至十几千米。

贝尔光电话和烽火报警一样，都是利用大气作为光通道，光波传播易受气候的影响，在大雾天气，它的可见度距离很短，遇到下雨下雪天也有影响。因此气候不好，光电话常常是不能通话，这显然限制了人们去考虑它的发展，甚至被人们忽视，几乎处于停顿状态。但是，贝尔光电话的遗产在现代光通信中仍闪烁着光芒。它的伟大发明，证明了可用光波作为载波来传递信息。

### 1.1.2 光纤通信

在大气光通信受阻之后，人们将研究的重点转入到地下光波通信的实验，先后出现过反射波导和透镜波导等地下通信的实验，如图 1-2 所示。但由于系统复杂、造价昂贵、施工调试困难而无法投入使用。1950 年，也曾出现过导光用的玻璃纤维（光纤），但传输损耗高达 1000dB/km 左右。于是有人认为用这类光纤作为光波传输手段并无实际意义。

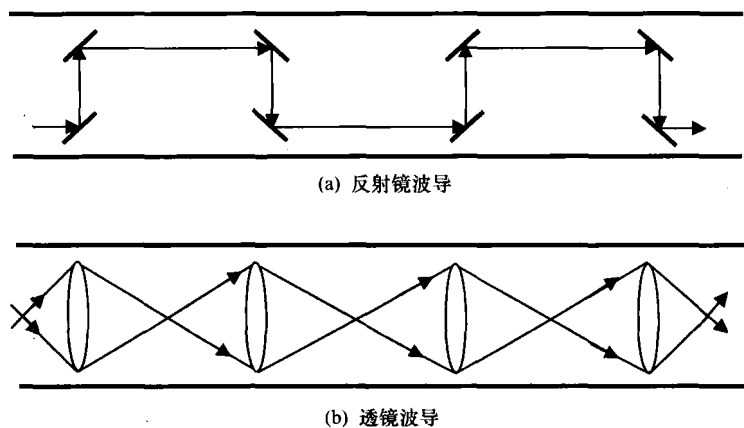


图 1-2 反射波导和透镜波导

1966 年，英籍华人高锟（K. C. Kao，当时工作于英国标准电信研究所）博士深入研究了光在石英玻璃纤维中的严重损耗问题，发现这种玻璃纤维引起光损耗的主要原因是其中含

有过量的铬、铜、铁与锰等金属离子和其他杂质，其次是拉制光纤时工艺技术造成了芯、包层分界面不均匀及其所引起的折射率不均匀，他还发现一些玻璃纤维在红外光区的损耗较小。同年 7 月，高锟和他的同事 A. G. Heckhom 等人发表了著名的论文《介质纤维表面光频波导》，首次谈到实用型光纤的制造与在通信上的应用，提出了光纤传输光信号理论。并指出如能将光纤中过渡金属离子减少到最低限度，并改进制造工艺，提高材料的均匀性，就可使光纤的质量大大地提高而成为实用的光传输介质，而且有可能使光纤的光损耗减少到每千米 1 分贝左右。他说：“一根带有包层的玻璃纤维，其芯线直径约为一个波长，总直径约 100 个波长，这根纤维就成为一根可能有实用价值的光学波导。它有充当新型通信手段的巨大潜力，其信息容量可能超过 100MHz。”

在高锟理论的指导下，1970 年美国的康宁公司拉出了第一根损耗为 20dB/km 的光纤。同一年贝尔实验室研制成功室温下可以连续工作的半导体激光器，其体积小、重量轻、功耗低、效率高，是光纤通信的理想光源。从此光纤通信开始飞速发展。

1977 年美国在芝加哥进行了 44.736Mbit/s 的现场实验。1978 年，日本开始了 32.064Mbit/s 和 97.728Mbit/s 的光纤通信实验。1979 年，美国 AT&T 和日本 NTT 均研制出了波长为 1.35 $\mu\text{m}$  的半导体激光器，日本也做出了超低损耗的光纤（损耗为 0.2dB/km，波长为 1.55 $\mu\text{m}$ ），同时进行了多模光纤（同时允许多个方向的光线在其中传送的光纤）1.31 $\mu\text{m}$  的长波长传输系统的现场试验。到 1980 年，多模光纤通信系统已经投入了商用，单模光纤（只允许一个方向的光线在其中传送的光纤）通信系统也进入了现场试验。1983 年，日本新建了一条从北海道至冲绳岛纵贯南北的光缆干线，全长 3400km，采用了 24 芯单模光纤光缆，传输速率为 400Mbit/s；美国也从东西海岸各敷设了一条光缆干线，长度分别为 600km 和 270km，芯数为 144 芯；紧接着又在 1985 年敷设了 2002km 的南北干线，增设了总长 5 万千米的光缆，把 22 个州用光缆连了起来，形成了长途光缆干线网。

我国从 20 世纪 70 年代初开始光通信的研究，到 1976 年研制出了可用于通信的多模光纤；1979 年，多模光纤在短波长窗口的损耗已低于 50dB/km，长波长窗口的损耗已低于 1.0dB/km，并于当年建成了长约 5.7km 的光纤数字通信试验系统。此后又分别在北京、上海、武汉、天津等地建立了现场试验系统，特别是 1983 年建成的连接武汉三镇的 8Mbit/s，1985 年扩容为 34Mbit/s 的数字光纤传输系统的开通使用，使我国的光纤通信开始走向实用化阶段。1987 年底，我国建成了从武汉至荆州全长约 250km 的第一条长距离架空光缆，使用国产长途光纤通信系统，传送 34Mbit/s 的数字信号。1988 年起，国内光纤通信系统的应用从多模向单模发展，建成了扬州至高邮全长 75km 的单模光纤传输系统，传输速率为 34Mbit/s；1989 年建成了合肥至芜湖单模光纤传输系统，传输速率为 140Mbit/s；1990 年利用国产设备建成了兰州至乌鲁木齐的直埋式长途光缆通信干线。“六五”期间，我国公用通信网建设光缆线路 331.5km，“七五”期间建设光缆线路 7310.5km，“八五”期间完成 22 条光缆干线的建设任务，使国内光缆总长度达到 14.5 万千米。1994 年以后，除极少数干线采用 622Mbit/s 系统外，大多数干线直接采用 2.5Gbit/s 系统、10Gbit/s 系统和波分复用系统。截止到 1998 年底，我国公用通信网已完成了连接全国 31 个省（自治区、直辖市）的“八纵八横”骨干光缆传输网建设，铺设的长途和本地中继光缆（不包括接入网）总长度为 100 万千米。到“十五”末全国光缆线路纤芯长度达 7596.6 万芯千米。

到如今，光纤通信已经发展到以采用光放大器（Optical Amplifier, OA）增加中继距离

和采用波分复用技术 (Wavelength Division Multiplexing, WDM) 增加传输容量为特征的第四代系统。单信道商用速率 (采用电时分复用 ETDM) 可以高达 40Gbit/s, 几乎到达了电子器件的极限速率; 商用波分复用系统在单根光纤中复用的业务通道数量可达 192 波, 每波接入的速率可达 10Gbit/s; 如仅接入 C 波段 80 个波道时, 每波接入的速率可以达到 40Gbit/s; 目前波分复用系统最高速率已经达到单光纤 25.6Tbit/s; 朗讯公司采用 80nm 谱宽的光放大器创造了波长数达 1 022 波的世界记录; Essex 公司更是宣称实现了信道间隔 1GHz 的 4 000 个波长的密集波分复用系统; 在超长距离传输方面, 华为公司能够实现 10Gbit/s 信号 5 000km 无电中继传送, 单跨超长传输距离可达 380km。

## 1.2 光纤通信的主要特性

光纤通信在短短的几十年中发展如此迅速, 并使得世界上 80% 以上的电信业务在光纤通信网中传送, 是与其无可比拟的优越性分不开的。

### 1.2.1 光纤通信的优点

#### 1. 光纤的容量大

光纤通信是以光纤为传输媒介, 光波为载波的通信系统, 其载波—光波具有很高的频率 (约  $10^{14}$  Hz), 因此光纤具有很大的通信容量。目前商用系统单信道速率可达 40Gbit/s (相当于一对光纤上同时传送 48 万多路电话), 多信道总容量可达 1.6Tbit/s (相当于 1 920 多万路电话)。即便如此, 使用的带宽也大概只有光纤带宽的 1%。图 1-3 所示为目前使用的石英光纤的带宽潜力。从图中可以看到: 目前使用的 1 310nm 和 1 550nm 两窗口的带宽和就有 20THz, 如果消除 OH 吸收峰, 长波长窗口的可用带宽可以到 50THz, 从 1 100nm~1 700nm 的带宽达 140THz。

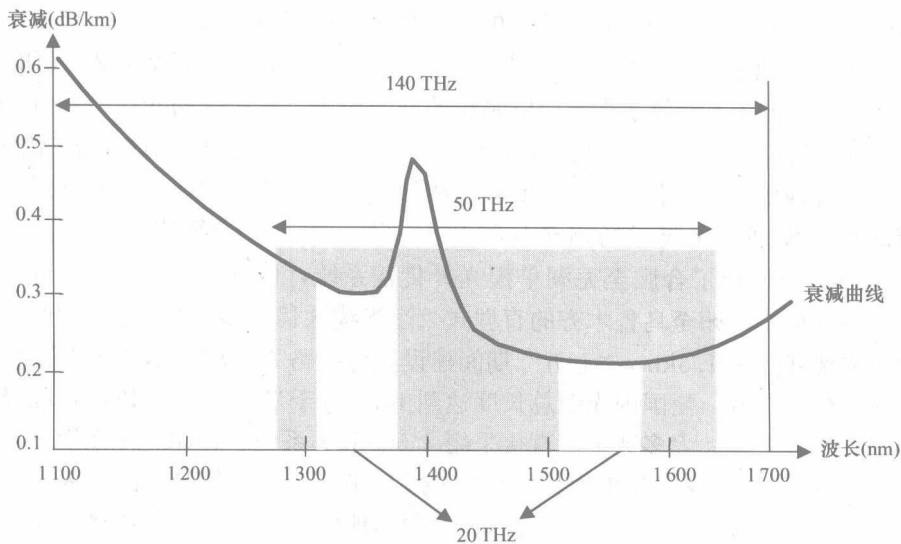


图 1-3 光纤带宽潜力

## 2. 损耗低、中继距离长

目前，实用的光纤通信系统使用的光纤多为石英光纤，此类光纤在  $1.55\mu\text{m}$  波长区的损耗可低到  $0.18\text{dB/km}$ ，比已知的其他通信线路的损耗都低得多，因此，由石英光纤组成的光纤通信系统的中继距离也较其他介质构成的系统长得多，参见表 1-1。

表 1-1 各种传输线路的中继距离

传输线路类型	最大通信容量 (路)	中继距离 (km)
大同轴电缆	10 800	1.5
小同轴电缆	3 600	2.1
微波线路	3 600	40
140Mbit/s 光纤通信系统	1 920	100
2.5Gbit/s 光纤通信系统	30 240	50~60

如果今后采用非石英光纤，并工作在超长波长 ( $>2\mu\text{m}$ )，光纤的理论损耗系数可以下降到  $10^{-3}\sim 10^{-5}\text{dB/km}$ ，此时光纤通信的中继距离可达数千，甚至数万千米。这样，在任何情况下光纤通信系统均可以不设中继系统，它对于降低海底通信的成本、提高可靠性及稳定性具有特别的意义。

## 3. 抗电磁干扰能力强

我们知道，电话线和电缆一般是不能跟高压电线平行架设的，也不能在电气化铁路附近铺设。这是因为高压电线会辐射出比较强的电磁波，开动的电气列车会产生很强的电火花，它们都会干扰电话线和电缆里传送的电信号，甚至会使打电话的人听不清对方在说什么。而光纤纤维是石英玻璃丝，是一种非导电的介质，交变电磁波在其中不会产生感生电动势，即不会产生与信号无关的噪声。这样，即使把它平行铺设到高压电线和电气铁路附近，也不会受到电磁干扰。因而光纤通信除了可以在邮电通信部门使用外，还特别适合在铁道、电力等部门使用。

## 4. 保密性能好

对通信系统的重要要求之一是保密性好。然而，随着科学技术的发展，电通信方式很容易被人窃听：只要在明线或电缆附近（甚至几千米以外）设置一个特别的接收装置，就可以获取明线或电缆中传送的信息。更不用去说无线通信方式。

光纤通信与电通信不同，由于光纤的特殊设计，光纤中传送的光波被限制在光纤的纤芯和芯包界面附近传送，很少会跑到光纤之外。即使在弯曲半径很小的位置，泄漏光功率也是十分微弱的。并且成缆以后光纤的外面包有金属做的防潮层和橡胶材料的护套，这些均是不透光的，因此，泄漏到光缆外的光几乎没有。更何况长途光缆和中继光缆一般均埋于地下。所以光纤的保密性能好。

此外，由于光纤中的光信号一般不会泄漏，因此电通信中常见的线路之间的串话现象也可忽略。

## 5. 体积小, 重量轻

目前常用光纤的纤芯直径只有几个微米, 加上包层以后, 光纤的直径是  $125\mu\text{m}$ , 比一根头发丝稍微粗一点。这样的光纤, 500m 长也不过一两重。为了保护光纤, 同时使它抗拉又抗弯, 在制作光纤的时候, 还在它的表面加上一层聚丙烯或者尼龙套层。加上这层套层以后, 它的直径也不超过 2mm。在实际通信线路中使用的不是单根的光纤, 而是把好多根光纤跟抗拉的钢丝、塑料和填充材料等组合在一起, 外面再套上厚橡胶皮, 这就是通常所说的光缆。这种光缆比电缆轻多了。有人把含有四根光纤的四芯光缆跟含有四根同轴管的同轴电缆作过比较, 同轴电缆的直径是 45mm, 而四芯光缆的直径只有 9mm, 1km 的四管同轴电缆重 4 400kg, 而 1km 的四芯光缆只有 200kg 重, 是电缆重量的 4.6%。采用这种又细又轻的光缆, 不管是运输, 还是铺设线路, 都很方便。另外, 这种又细又轻的光缆, 还特别适合用在飞机和宇宙飞船上。

## 6. 节省有色金属和原材料

光纤的主要成分是二氧化硅 ( $\text{SiO}_2$ ), 因此, 使用光纤可以节约大量的有色金属。我们知道, 生产电缆需要大量的铜和铅。比如, 生产 1km 四管同轴电缆, 需要 500kg 铜、1 500kg 铅, 这些有色金属在地球上的含量是极其有限的。而二氧化硅在地球上遍地都是, 可以说, 取之不尽, 用之不竭。所以, 光纤通信技术的发展应用既节约了大量的有色金属材料, 也不会受到资源的限制。

### 1.2.2 光纤通信的缺点

事物都是一分为二的, 光纤通信有许多优点, 因而发展很快, 但光纤通信也有以下缺点。

#### 1. 抗拉强度低

光纤的理论抗拉强度要大于钢的抗拉强度。但是, 由于光纤在生产过程中表面存在或产生微裂痕, 光纤受拉时应力全都加于此, 从而使光纤的实际抗拉强度非常低, 这就是裸光纤很容易折断的原因。为了保护光纤, 在光纤制造使用过程中采用一系列保护措施。一是, 在光纤的生产过程中, 给裸光纤增加涂覆层。二是, 在光缆制造过程中, 增加特殊的抗拉元件。三是, 在光缆的施工过程中应将绝大部分拉力加在抗拉元件上, 使光纤基本不受到拉力。

#### 2. 光纤连接困难

要使光纤的连接损耗小, 两根光纤的纤芯必须严格对准。由于光纤的纤芯很细 (只有几个微米), 加之石英的熔点很高, 因此连接很困难, 需要有昂贵的专门工具。

#### 3. 光纤怕水

水进入光缆后主要会产生 3 方面的问题。其一, 水进入光纤后, 会增加光纤的  $\text{OH}^-$  吸收损耗, 使信道总损耗增大, 甚至使通信中断; 其二, 水进入光缆后, 会造成光缆中的金

属构件氧化,使金属构件腐蚀,导致光缆强度降低;其三,进入光缆中的水遇冷后,水结冰体积增大有可能压坏光纤。为了保持光纤的特性不致劣化,在光纤和光缆的结构设计、生产、运输、施工、维护中应采取针对性的防水措施。

另外,光纤通信还存在分路、耦合不方便,弯曲半径不能太小等缺点。但应当指出,随着研究的深入和技术的发展,光纤通信的这些缺点都已被克服了,已经不再影响光纤通信的推广和应用。在此介绍这些缺点的目的,是要求我们在实际应用时尽量避免这些问题的发生。

### 1.3 光纤通信系统的组成和分类

#### 1.3.1 光纤通信系统的组成

光纤通信系统是以光纤为传输媒介,光波为载波的通信系统。主要由光发送机、光纤光缆、中继器和光接收机组成,如图 1-4 所示(图中只画出了一个传输方向)。此外,系统中还包含了一些互连和光信号处理部件,如光纤连接器、隔离器、光开关等。

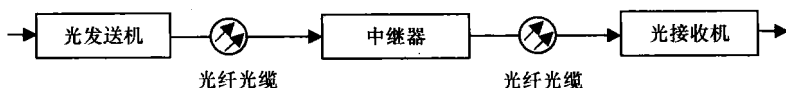


图 1-4 光纤通信系统构成

系统中光发送机的作用是将电信号转换为光信号,并将生成的光信号注入光纤。光发送机一般由驱动电路、光源和调制器构成,如果是直接强度调制可以省去调制器,这些将在后续章节中详细介绍。

光接收机的作用是将光纤送来的光信号还原成原始的电信号。它一般由光电检测器和解调器组成,对于直接强度调制解调器可以省略。

光纤光缆的作用是为光信号的传送提供传送媒介(信道),将光信号由一处送到另一处。

中继器分为电中继器和光中继器(光放大器)两种,其主要作用就是延长光信号的传输距离。电中继器是将经过长途传输损耗了的、有畸变的光信号转换为电信号,进行再定时、整形、再生出规则的电脉冲,然后再转换为光信号送入光纤;光中继器(光放大器)不需要进行光—电—光的转换,直接对光信号进行放大,因此比较简单。但光放大器不能对被放大信号进行再定时、整形和再生,也就是说,它在放大信号的同时,也放大了噪声,因此,一般在连续应用几个光放大器以后,要用一个电中继器进行再定时和整形。

#### 1.3.2 光纤通信系统的分类

根据不同的分类方法,光纤通信系统可以分为不同的类型。

根据调制信号的类型,光纤通信系统可以分为模拟光纤通信系统和数字光纤通信系统。模拟光纤通信系统的调制信号为模拟信号,它具有设备简单的特点,一般多用于广播电视系统传送视频信号,如有线电视的 HFC 网。数字光纤通信系统的调制信号是数字信号,它具有通信质量高,传输距离远等优点,目前得到了广泛的应用。

根据光源的调制方式,光纤通信系统可以分为直接调制光纤通信系统和间接调制光纤通

信系统。直接调制光纤通信系统是用输入电信号直接施加于光源的驱动电路上,对光源的注入电流进行调制,具有设备简单的特点,因此在低速率设备中得到了广泛应用。在直接调制产生的啾啾噪声影响通信系统的性能时,就要采用外调制器将电信号调制在光波上,这种系统就是间接调制光纤通信系统,它具有调制速率高的优点,因此在一些高速系统中经常采用。

根据光纤的传导模数量,光纤通信系统可以分为多模光纤通信系统和单模光纤通信系统。多模光纤通信系统是以多模光纤为传输媒介的光纤通信系统,早期应用较多,目前应用较少,只在部分局域网中还在使用,其传输距离短、带宽窄。单模光纤通信系统是以单模光纤为传输媒介的光纤通信系统,其传输距离长,传输带宽宽,目前被广泛应用于长途以及大容量的通信系统中。

根据系统的工作波长,光纤通信系统可分为短波长光纤通信系统、长波长光纤通信系统和超长波长光纤通信系统。短波长光纤通信系统的工作波长为 $0.7\sim 0.9\mu\text{m}$ ,由于其线路损耗大,传输距离短,早已不再使用。长波长光纤通信系统的工作波长为 $1.1\sim 1.6\mu\text{m}$ ,是现在普遍采用的光纤通信系统,其损耗小,中继距离长。超长波长光纤通信系统的工作波长大于 $2\mu\text{m}$ ,采用的光纤为非石英光纤,具有损耗极低,中继距离极长的优点,是光纤通信的发展方向。

根据其他的分类方法,光纤通信系统还可以有其他类型,这里不再叙述。

## 复习思考题

1. 第一根光纤是什么时候出现的?其损耗是多少?
2. 试述光纤通信系统的组成及各部分的作用。
3. 光纤通信有哪些优缺点?
4. 查阅相关资料,简述当前光纤通信系统的商用和实验室速率(单信道、多信道)。
5. 查阅相关资料,简述当前光纤研究的一些最新技术。

光纤作为光纤通信系统的物理传输媒介，有着巨大的优越性。简单地说光纤就是用来导光的透明介质纤维。光纤虽细，但其传输理论却很复杂。众所周知，光具有波粒二象性，光既可以看成电磁波，又可以看成由粒子组成的粒子流。因此，分析光纤中光的传输理论也有两套：波动光学理论和射线光学（即几何光学）理论。

本章首先介绍光纤的结构与类型，然后用射线光学理论和波动光学理论重点分析光在阶跃型光纤中的传播情况，最后简要介绍光缆的构造、典型结构与光缆的型号。

## 2.1 光纤的结构与类型

### 2.1.1 光纤的结构

光纤（Optical Fiber, OF）是用来导光的透明介质纤维。一根实用化的光纤是由多层透明介质构成的，一般可以分为 3 部分：折射率较高的纤芯、折射率较低的包层和外面的涂覆层，如图 2-1 所示。纤芯是由高度透明的材料制成的；包层的折射率略小于纤芯的折射率，从而造成一种光波导效应，使大部分的电磁场被束缚在纤芯中传输；涂覆层的作用是保护光纤不受水汽的侵蚀和机械擦伤，同时增加光纤的柔韧性，它不用来导光，因此可以染成各种颜色。

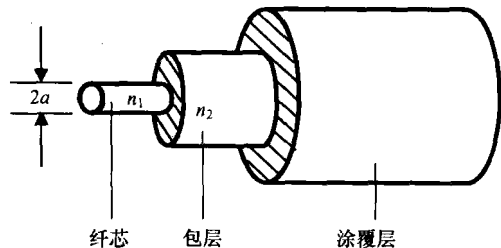


图 2-1 光纤结构示意图

为了满足不同的导光要求，包层有的是单层，有的是多层；涂覆层一般分为一次涂覆层和二次涂覆层，二次涂覆层是在一次涂覆层的外面涂上一层热塑材料，故又称为套塑。现在通信用光纤包层直径一般为  $125\mu\text{m}$ 。纤芯的粗细、纤芯材料的折射率分布和包层材料的折射率分布，对光纤特性起着决定性的作用。包层材料通常是均匀材料，折射率为常数；如果有多层包层，则各包层的折射率不同（如 W 型光纤）。

### 2.1.2 光纤的类型

光纤的分类方法很多，既可以按照光纤截面折射率分布来分类，又可以按照光纤中传输



模式数的多少、光纤使用的材料或传输的工作波长来分类。根据不同的分类方法,同一根光纤将会有不同的名称。

### 1. 按光纤截面上折射率分布分类

按照截面上折射率分布的不同,可以将光纤分为阶跃型光纤 (Step-Index Fiber, SIF) 和渐变型光纤 (Graded-Index Fiber, GIF), 其折射率分布如图 2-2 所示。

阶跃型光纤中纤芯的折射率为常数  $n_1$ , 而在纤芯与包层的分界面处折射率突然变小, 包层的折射率为  $n_2$ , 如图 2-2 (a) 所示。光纤的折射率变化可以用折射率沿半径的分布函数  $n(r)$  来表示。

$$n(r) = \begin{cases} n_1 & r < a \\ n_2 & r \geq a \end{cases} \quad (2-1)$$

渐变型光纤纤芯的折射率连续变化, 轴心处的折射率最大, 然后随着  $r$  的增大逐渐减小, 直到等于包层的折射率, 如图 2-2 (b) 所示。折射率的变化也可以用  $n(r)$  来表示。

$$n(r) = \begin{cases} n_m \left[ 1 - 2\Delta \left( \frac{r}{a} \right)^\alpha \right]^{1/2} & r < a \\ n_c & r \geq a \end{cases} \quad (2-2)$$

式中:  $\alpha$  为光纤折射率分布指数,  $a$  为光纤纤芯半径,  $\Delta$  为光纤的相对折射率差,  $n_m$  为纤芯中的最大折射率,  $n_c$  为包层的折射率。

$\alpha$  值不同, 光纤的折射率分布也不一样, 如图 2-3 所示。 $\alpha=2$  时为抛物线型折射率分布;  $\alpha=1$  时为三角型折射率分布;  $\alpha \rightarrow \infty$  时, 光纤的折射率分布呈阶跃型, 因此阶跃型光纤可以认为是渐变光纤的一种极限形式。

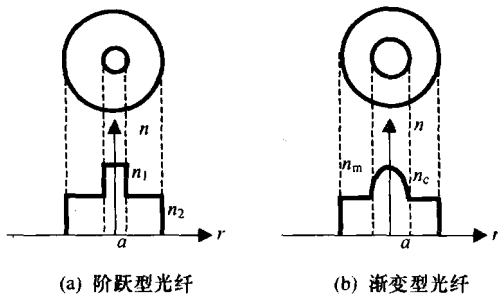


图 2-2 光纤的折射率分布

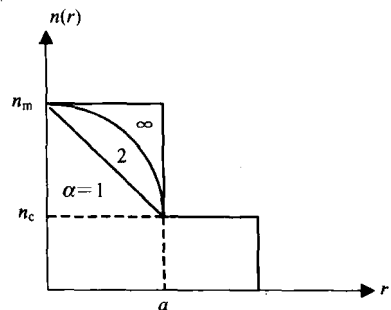


图 2-3 不同  $\alpha$  值的折射率分布

### 2. 按传输模式的数量分类

按光纤中传输的模式数量, 可以将光纤分为多模光纤 (Multi-Mode Fiber, MMF) 和单模光纤 (Single Mode Fiber, SMF)。

在一定的工作波长上, 当有多个模式在光纤中传输时, 则这种光纤称为多模光纤。多模光纤截面折射率的分布有均匀和非均匀两种, 如图 2-4 (a)、(b) 所示, 前者称为多模均匀光纤, 即阶跃型多模光纤; 后者称为多模非均匀光纤, 即渐变型多模光纤。多模光纤的纤芯直径一般为  $50\mu\text{m}$ , 包层外径为  $125\mu\text{m}$ 。由于纤芯直径较大, 传输模式较多, 这种光纤的传输特性较差, 带宽较窄, 传输容量也较小。