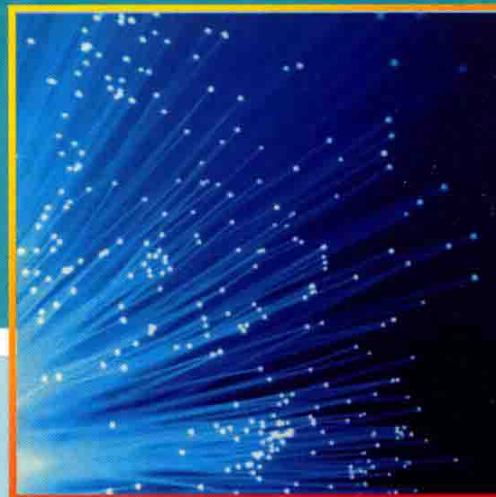


高等院校应用技术型人才培养规划教材

光纤通信技术

GUANGXIAN TONGXIN JISHU

夏林中 杨文霞 曹雪梅 主编



中国铁道出版社
CHINA RAILWAY PUBLISHING HOUSE

非
外
借

高等院校应用技术型人才培养规划教材

光纤通信技术

夏林中 杨文霞 曹雪梅 主 编

中国铁道出版社
CHINA RAILWAY PUBLISHING HOUSE

内 容 简 介

本书共分 15 章, 内容包括光纤通信概述、光纤与光缆、光纤通信器件、光纤通信网络、光纤通信接口技术、光纤通信网硬件平台搭建、光传输网基础、SDH 传输网工作原理、SDH 网元组网方式和设备规范、SDH 网络保护、SDH 时钟同步原理、SDH 传输网规划与设备选型、PTN 传输网基础、PTN 传输网工作原理、PTN 传输网关键技术。

本书内容全面, 讲解深入浅出, 实践性与理论性相结合, 适合作为高等院校通信技术、移动通信技术、电子通信等专业“光纤通信技术”课程的教材, 也可供相关专业技术人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

光纤通信技术/夏林中, 杨文霞, 曹雪梅主编. — 北京: 中国铁道出版社, 2017. 10

高等院校应用技术型人才培养规划教材

ISBN 978-7-113-22614-5

I. ①光… II. ①夏… ②杨… ③曹… 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 (2017) 第 167298 号

书 名: 光纤通信技术
作 者: 夏林中 杨文霞 曹雪梅 主编

策 划: 王春霞
责任编辑: 王春霞 徐盼欣
封面设计: 付 巍
封面制作: 刘 颖
责任校对: 张玉华
责任印制: 郭向伟

读者热线: (010) 63550836

出版发行: 中国铁道出版社 (100054, 北京市西城区右安门西街 8 号)

网 址: <http://www.tdpress.com/51eds/>

印 刷: 虎彩印艺股份有限公司

版 次: 2017 年 10 月第 1 版 2017 年 10 月第 1 次印刷

开 本: 787 mm×1 092 mm 1/16 印张: 14 字数: 337 千

书 号: ISBN 978-7-113-22614-5

定 价: 35.00 元



版权所有 侵权必究

凡购买铁道版图书, 如有印制质量问题, 请与本社教材图书营销部联系调换。电话: (010) 63550836

打击盗版举报电话: (010) 51873659

光纤通信技术自问世以来得到了飞速发展,并成为通信专业知识体系的重要组成部分。目前,无论是骨干网还是接入网,无论是陆地通信还是海底光缆通信,无论是数据传输还是语音传输,都离不开光纤通信,光纤已无处不在,无时不用。所以,对于从事信息技术的人员来讲,了解和掌握光纤通信技术是至关重要的。

本书针对高等院校通信技术、移动通信技术、电子通信等专业“光纤通信技术”课程的需求而编写,其目的是让高等院校学生学习光纤通信技术,掌握光纤通信网的搭建、运行、维护与管理的必备知识。

全书分为三部分 15 章。第一部分介绍光纤通信技术基础,共 6 章(包含第 1 章~第 6 章)。第 1 章讲述了通信技术的发展史、光纤通信的优缺点等内容;第 2 章讲述了光纤分类和结构、光纤如何对光进行传导、单模光纤和多模光纤、光缆结构等内容;第 3 章讲述了有源器件、无源器件等内容;第 4 章讲述了常用的光纤通信网络的内容;第 5 章讲述了光接口技术、电接口技术、光纤通信复用技术等内容;第 6 章讲述了光纤通信网机房环境要求、硬件安装准备、硬件安装流程与规范、线缆布放与绑扎基本工艺、光纤绑扎带等内容。第二部分介绍同步数字传输系列(SDH),共 6 章(包含第 7 章~第 12 章)。第 7 章讲述了光传输网基础;第 8 章讲述了 SDH 传输网工作原理;第 9 章讲述了 SDH 网元组网方式和设备规范;第 10 章讲述了 SDH 网络保护;第 11 章讲述了 SDH 时钟同步原理;第 12 章讲述了 SDH 传输网规划与设备选型。第三部分介绍分组传送网(PTN),共 3 章(包含第 13 章~第 15 章)。第 13 章讲述了 PTN 传输网基础;第 14 章讲述了 PTN 传输网工作原理;第 15 章讲述了 PTN 传输网关键技术。

本书由夏林中、杨文霞、曹雪梅主编,具体分工如下:第一部分由夏林中编写,第二部分由杨文霞编写,第三部分由曹雪梅编写。在编写成稿的过程中得到了深圳市讯方技术股份有限公司的帮助和支持,支持的内容主要包括硬件搭建规范和操作流程,并提供了若干实际操作图片,在此表示衷心的感谢。

由于编者水平有限,书中难免存在不足之处,恳请广大读者批评指正,以便在今后的修订工作中进一步改进。

编 者

2017 年 7 月

第1章 光纤通信概述 1

- 1.1 探索时期的光通信 1
- 1.2 光传输介质的研究与进展 2
- 1.3 光源的研究与进展 3
- 1.4 光纤通信系统的发展 4
- 1.5 光纤通信的优点和应用 5
- 本章小结 7
- 思考与练习 7

第2章 光纤与光缆 8

- 2.1 光纤发展概述 8
- 2.2 光纤分类和结构 9
 - 2.2.1 光纤分类 9
 - 2.2.2 光纤结构 10
- 2.3 光纤如何对光进行传导 12
 - 2.3.1 光波 12
 - 2.3.2 全反射 13
 - 2.3.3 数值孔径简介 14
- 2.4 单模光纤和多模光纤 15
- 2.5 光缆简介 17
 - 2.5.1 光缆的种类和结构 17
 - 2.5.2 光缆线路工程技术 19
 - 2.5.3 光缆型号及命名 20
 - 2.5.4 光缆网简介 21
- 本章小结 22
- 思考与练习 22

第3章 光纤通信器件 23

- 3.1 有源器件 23
 - 3.1.1 光源和光发射机 23
 - 3.1.2 光检测器和光接收机 25
 - 3.1.3 光放大器 28
- 3.2 无源器件 31
 - 3.2.1 耦合器 31
 - 3.2.2 连接器 33
 - 3.2.3 隔离器 35

- 3.2.4 环形器 37
- 3.2.5 滤波器 37
- 3.2.6 衰减器 39
- 3.2.7 光开关 39
- 3.2.8 复用器 41
- 本章小结 44
- 思考与练习 44

第4章 光纤通信网络 45

- 4.1 光纤通信网络概述 45
 - 4.1.1 光纤网络系统组成 45
 - 4.1.2 光纤网络的分类 46
- 4.2 各种数据类型的光网络系统 46
 - 4.2.1 光纤计算机网 47
 - 4.2.2 光纤电话网 48
 - 4.2.3 光纤电视网 49
- 4.3 关键光网络技术 50
 - 4.3.1 同步数字体系 (SDH) 50
 - 4.3.2 多业务传输平台 (MSTP) 51
 - 4.3.3 波分复用 (WDM) 52
 - 4.3.4 光传送网 (OTN) 53
 - 4.3.5 分组传送网 (PTN) 54
- 4.4 光网络发展情况概述 55
- 本章小结 55
- 思考与练习 55

第5章 光纤通信接口技术 56

- 5.1 光接口技术 56
 - 5.1.1 光纤的种类 57
 - 5.1.2 光接口类型 57
 - 5.1.3 光接口参数 58
- 5.2 电接口技术 62
- 本章小结 62
- 思考与练习 62

第6章 光纤通信网硬件平台搭建 63

- 6.1 机房环境要求 63

6.1.1	机房建筑要求	64
6.1.2	电源要求	64
6.1.3	保护系统要求	67
6.2	硬件安装准备	69
6.3	硬件安装流程与规范	74
6.3.1	硬件安装流程	74
6.3.2	硬件安装规范	74
6.4	机房配线架认识	75
6.5	线缆布放与绑扎基本工艺	77
6.5.1	线缆认识	77
6.5.2	线缆布放工艺	77
6.5.3	线缆绑扎工艺	78
6.6	光纤绑扎带	79
6.6.1	光纤绑扎带的结构和裁剪	79
6.6.2	光纤绑扎带使用	80
6.7	工程标签	80
6.7.1	标签简介	81
6.7.2	标签使用说明	81
6.7.3	标签的书写	82
6.7.4	标签的粘贴方法	83
6.7.5	常见工程标签介绍	84
6.8	制作电缆接头并测试	89
6.8.1	装接同轴电缆的接头	89
6.8.2	测试电缆通断	93
6.9	2M 线制作	94
	本章小结	95
	思考与练习	95

第 7 章 光传输网基础 96

7.1	光传输网概述	96
7.2	光传输技术	97
7.2.1	数字光纤通信系统的组成	97
7.2.2	PDH 技术	98
7.2.3	SDH 技术	102
7.3	光纤接入技术	105
7.3.1	无源光网络技术	105
7.3.2	ATM 无源光网络	106
7.3.3	以太网无源光网络	107
7.3.4	吉比特无源光网络	108
	本章小结	108
	思考与练习	108

第 8 章 SDH 传输网工作原理 109

8.1	SDH 的帧结构、复用结构 和映射方法	109
8.1.1	SDH 的帧结构	109
8.1.2	SDH 的复用结构和 映射方法	112
8.2	SDH 的开销	118
8.2.1	段开销	118
8.2.2	通道开销	123
8.3	SDH 的指针	127
8.3.1	管理单元指针	127
8.3.2	支路单元指针	130
8.4	网元网络地址定义	131
8.4.1	网元网络地址的组成	131
8.4.2	网元网络地址实例	132
8.5	SDH 传输性能	132
8.5.1	可用性参数	132
8.5.2	误码性能	132
8.5.3	抖动漂移性能	134
	本章小结	136
	思考与练习	136

第 9 章 SDH 网元组网方式和 设备规范 137

9.1	网元简介	137
9.1.1	分/插复用器	137
9.1.2	终端复用器	138
9.1.3	数字交叉连接设备	138
9.1.4	再生中继器	139
9.2	各类 SDH 传输网结构	139
9.2.1	SDH 网络简单拓扑结构	139
9.2.2	SDH 网络中常用的 组网结构	141
9.2.3	SDH 网络的整体结构	144
9.3	SDH 传输网的应用形式	146
9.4	SDH 网元设备规范	147
9.4.1	SPI: SDH 物理 接口功能块	149
9.4.2	RST: 再生段终端 功能块	149

9.4.3	MST: 复用段终端 功能块.....	150	10.3	自愈环保护	160
9.4.4	MSP: 复用段保护 功能块.....	151	10.3.1	通道保护环与复用段 保护环	160
9.4.5	MSA: 复用段适配 功能块.....	152	10.3.2	二纤单向通道保护环	161
9.4.6	TTF: 传送终端功能块	152	10.3.3	二纤双向通道保护环	162
9.4.7	HPC: 高阶通道连接 功能块.....	152	10.3.4	二纤单向复用段环	162
9.4.8	HPT: 高阶通道终端 功能块.....	153	10.3.5	四纤双向复用段保护环...163	
9.4.9	LPA: 低阶通道适配 功能块.....	153	10.3.6	二纤双向复用段保护环...165	
9.4.10	PPI: PDH 物理接口 功能块.....	153	10.4	链形网保护	166
9.4.11	HPA: 高阶通道适配 功能块.....	154	10.4.1	链形网简介	166
9.4.12	HOA: 高阶组装器.....	154	10.4.2	链形网保护.....	167
9.4.13	LPC: 低阶通道连接 功能块.....	154	本章小结	167	
9.4.14	LPT: 低阶通道终端 功能块.....	155	思考与练习	168	
9.4.15	LPA: 低阶通道适配 功能块.....	155	第 11 章 SDH 时钟同步原理.....	169	
9.4.16	PPI: PDH 物理接口 功能块.....	155	11.1	时钟同步基本原理	169
9.4.17	LOI: 低阶接口功能块....	155	11.1.1	主从同步	170
9.4.18	SEMF: 同步设备管理 功能块.....	155	11.1.2	主从同步的优点	170
9.4.19	MCF: 消息通信功能块	156	11.1.3	时钟类型	170
9.4.20	SETS: 同步设备定时源 功能块.....	156	11.1.4	时钟工作模式.....	171
9.4.21	SETPI: 同步设备定时 物理接口	156	11.2	SDH 网同步原理	171
9.4.22	OHA: 开销接入功能块	156	11.2.1	SDH 的引入对网同步的 影响	172
本章小结	158		11.2.2	SDH 网络的同步原则	172
思考与练习	158		11.2.3	SDH 网元时钟源的种类	173
第 10 章 SDH 网络保护	159		11.2.4	SDH 网络常见的 定时方式	173
10.1	网络保护的必要性	159	11.3	S1 字节和 SDH 网络时钟 保护倒换原理	175
10.2	自愈的基本概念	160	11.3.1	S1 字节工作原理	175
			11.3.2	SDH 网络时钟保护 倒换原理.....	176
			11.3.3	工作实例介绍	176
			本章小结	178	
			思考与练习	179	
			第 12 章 SDH 传输网规划与设备 选型	180	
			12.1	传输网规划	180
			12.1.1	建设原则	180
			12.1.2	规划要点	181

12.1.3	本地网规划路线图	182
12.2	SDH 常见设备简介	182
12.3	SDH 常见设备选择原则	183
	本章小结	184
	思考与练习	184
第 13 章	PTN 传输网基础	185
13.1	PTN 技术发展背景	185
13.2	MSTP 技术	186
13.2.1	MSTP 技术概述	186
13.2.2	MSTP 的关键技术	187
13.3	OTN 技术	189
13.3.1	OTN 定义	189
13.3.2	OTN 的分层结构	190
13.3.3	OTN 的帧结构	190
	本章小结	191
	思考与练习	191
第 14 章	PTN 传输网工作原理	192
14.1	PTN 定义	192
14.2	MPLS 技术	192
14.2.1	MPLS 定义	192
14.2.2	MPLS 的标签交换原理	193
14.2.3	MPLS 的标签结构	194
14.2.4	MPLS 的标签交换过程	194
14.3	PTN 技术原理	195
14.3.1	PTN 原理概述	195
14.3.2	PTN 分层结构	197
14.3.3	PTN 的基本功能	198

14.3.4	PTN 与 SHD/MSTP 的比较	199
	本章小结	200
	思考与练习	200
第 15 章	PTN 传输网关键技术	201
15.1	伪线仿真技术	201
15.1.1	PWE3 工作原理	201
15.1.2	PWE3 的分类	202
15.2	PTN 保护技术	202
15.2.1	PTN 技术线性保护	203
15.2.2	APS 保护	204
15.3	OAM 技术	205
15.3.1	OAM 定义	205
15.3.2	OAM 帧	206
15.3.3	PTN 的 OAM 功能	206
15.4	QoS 技术	208
15.4.1	QoS 的服务模型	208
15.4.2	QoS 功能	209
15.5	同步技术	210
15.5.1	同步的概念	210
15.5.2	同步技术简介	211
15.6	PTN 组网技术	212
15.6.1	PTN 组网概述	212
15.6.2	PTN 组网应用	213
	本章小结	215
	思考与练习	215
	参考文献	216

第1章

光纤通信概述

知识目标

- (1) 了解光通信的发展历史。
- (2) 了解光源的发展历史。
- (3) 了解光通信系统传输介质的发展历史。
- (4) 了解我国光纤通信系统的发展历史和现状。

1.1 探索时期的光通信

光通信在两千多年前就已经存在了, 据中国相关历史记载, 公元前 800 年左右, 当时为了军事需要, 古人发明了用火光传递少量信息。例如, 中国古代“周幽王烽火戏诸侯”(见图 1.1) 的故事就流传很广, 昏君周幽王非常宠爱自己的爱妃, 为了让爱妃开心, 在无军情的情况下点燃了烽火, 各路诸侯看到烽火后以为有军情, 于是就派兵赶到王城救援, 结果发现并无军情, 各路诸侯气愤而回。此处用来传递信息的媒介就是火光。

据相关历史记载, 公元前 200 年左右, 在古希腊有个叫 Polybios 的人, 他发明了一种光传输系统(见图 1.2), 这种光传输系统不仅可以传递一些固定信息, 而且可以传递事先排版好的字母信息。该传输系统每分钟大约能传输 8 个字母, 换算成现代的传输速率则是 1 bit/s, 而现代通信系统的传输速率为 Tbit/s 量级。



图 1.1 周幽王烽火戏诸侯

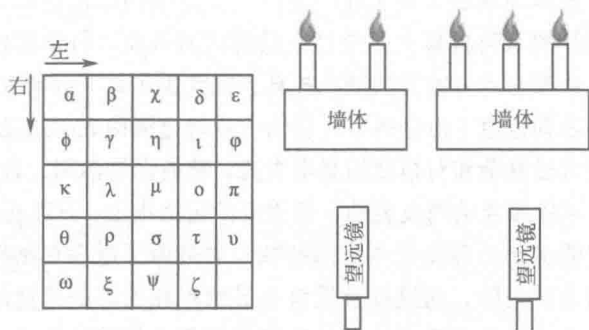


图 1.2 Polybios 发明的光传输系统

1880 年, 美国著名科学家贝尔发明了一种用光传递语音信息的通话系统, 如图 1.3 所示。在该光电通话系统中, 光源是由弧光灯产生的, 然后通过透镜将弧光灯的恒定光束投射到传声器(俗称话筒)的音膜上。当有声音时, 音膜就会发生振动, 为此通过音膜反射的光束会随着音膜振动而产生相应的光强度变化, 这个过程就是光强调制。由于受到各类干扰因素的影响, 该系统传输距离很短, 并且实用价值很小, 但是该系统直接证明了用光波作为载波传

送信息是可行的。

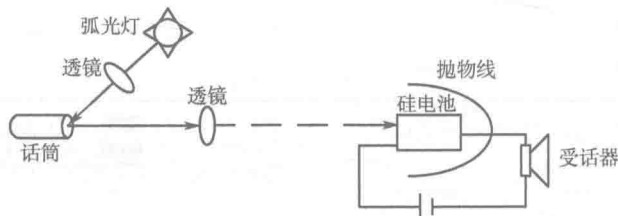


图 1.3 贝尔光电电话系统

随后光通信的发展又沉寂了几十年，直到 20 世纪 60 年代，美国科学家梅曼发明了红宝石激光器（见图 1.4），为此激光技术得到了迅猛发展，随之出现了 He-Ne 气体激光器、CO₂ 激光器、半导体激光器等。这些优质光源的诞生，促使现代光通信的实现成为可能。

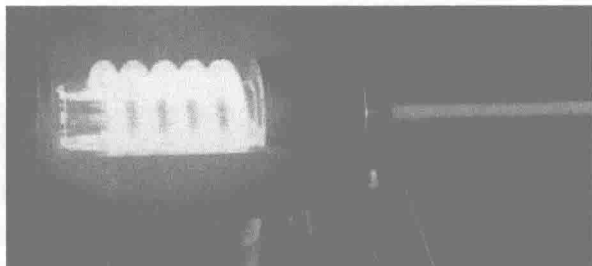


图 1.4 梅曼发明的红宝石激光器

1.2 光传输介质的研究与进展

1854 年，英国物理学家廷德尔在英国皇家学会中的一次演讲中指出：在盛满水的弯曲管道中，光线可以通过反射顺着管道向前传输。到了 20 世纪 20 年代，英国科学家贝尔德依据上述原理成功实现了在石英纤维中传输图像信息的实验。为此，科学家们将目光集中到制作光纤的石英材料上。经过一段时间的研究，科学家们发现石英光纤的损耗非常大，而且在当时并没有太好的方法减小损耗，因此关于此类的研究相对减少很多。到了 1965 年，美国科学家米勒报道了由金属空心管内一系列透镜构成的透镜光波导可避免大气传输的缺点，但因其结构太过复杂和对精度的要求太高，从而无法商用。直到 1966 年，英籍华人高锟（见图 1.5）和科学家霍克哈姆发表的一篇重要的论文指出：石英光纤的损耗之所以很高（达到 1000 dB/km），并非由于石英光纤本身的特性，而是由于过去在制作石英光纤的过程中，没有将石英光纤中的杂质去除，而这些杂质就是导致损耗很高的直接原因，可以通过改进石英光纤的制造工艺来消除这些杂质，从而达到降低石英光纤损耗的目的，使利用石英光纤进行光信息传输成为可能。随后，美国康宁玻璃公司的马瑞尔、卡普隆和凯克三名科研人员通过改进石英光纤的制造工艺，成功制作了第一根可以实用的光纤，其损耗低至 20 dB/km，因此，石英光纤具备了与同轴电缆相当的竞争能力，为光纤的商用铺平了道路。此后，科学家们通过不断地改进石英光纤的制造工艺，取得了一个接一个的突破。到了 1979 年，通过科学家们的不懈努力，光纤的损耗从 20 dB/km 降到了 0.2 dB/km，该损耗值已接近理论极限。



图 1.5 光纤之父英籍华人高锟

自从 20 世纪 70 年代光纤损耗降到实用化水平以来,最先广泛使用的光纤是工作波长为 $0.85\text{ }\mu\text{m}$ 的多模光纤,这种光纤被当时的 CCITT (现 ITU-T) 列为 G.651 光纤。随着激光技术的发展,损耗更低和带宽更宽的 $1.3\text{ }\mu\text{m}$ 波长的光纤得到了广泛的应用。80 年代初,工作波长为 $1.31\text{ }\mu\text{m}$ 和色散为零的单模光纤开始商用,这种光纤被 CCITT 列为 G.652 单模光纤。90 年代初,由于波长为 $1.55\text{ }\mu\text{m}$ 的商用化激光器的出现,随之 $1.55\text{ }\mu\text{m}$ 的色散位移光纤开始广泛使用,此种光纤被 CCITT 列为 G.653 光纤,这种光纤主要用于海底光缆系统,它可以将单一波长传送几千千米。

随着光纤技术的不断发展,各种应用场合的光纤被发明和生产出来,如非零色散位移光纤、色散补偿光纤、色散斜率补偿光纤等。在现代光纤通信中,光纤主要分为多模光纤和单模光纤,在多模光纤中,纤芯的直径是 $50\text{ }\mu\text{m}$ 和 $62.5\text{ }\mu\text{m}$ 两种。而单模光纤纤芯的直径为 $8\sim 10\text{ }\mu\text{m}$,常用的是 $9/125\text{ }\mu\text{m}$ ($9/125\text{ }\mu\text{m}$ 指光纤的纤芯直径为 $9\text{ }\mu\text{m}$,包层直径为 $125\text{ }\mu\text{m}$) 的单模光纤,纤芯外面是包层,包层外面是一层薄的塑料外套,即涂覆层,如图 1.6 所示。

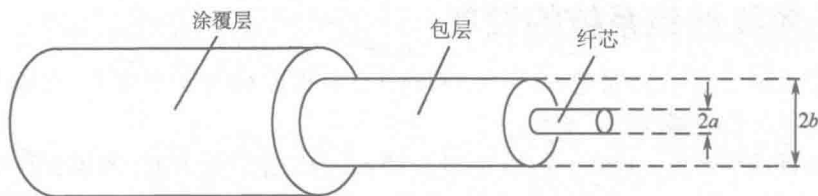


图 1.6 光纤结构示意图

1.3 光源的研究与进展

作为光通信必不可少的光源也经历了一个漫长的发展过程,从烽火到灯泡的发明,经历了两千年时间。当灯泡作为光源时,它的调制速度非常有限,因此只能载运一路音频信号,为此用灯泡作为光通信的光源的应用前景非常有限。到了 20 世纪 60 年代之后,不同激光器的发明给光通信带来了巨大的希望,这是因为激光器的各方面特性非常适合作为光通信的光源。尤其是研制出了具有室温连续振荡工作的镓铝砷双异质结半导体激光器之后,加上使用寿命达到 10 万 h 以上的半导体激光器的商用,使得高速光通信成为现实。

光通信用激光器的发展也经历了一个发展过程,主要脉络是:1960 年,美国科学家梅曼

发明世界第一台激光器；1962年，GaAs 半导体激光二极管问世；1977年，美国贝尔实验室制作出了半导体激光器；1976年，日本电报电话公司成功制作出了 $1.3\text{ }\mu\text{m}$ 的钢镓砷磷激光器；1979年，美国电报电话公司和日本电报电话公司成功研制了 $1.5\text{ }\mu\text{m}$ 的连续振荡半导体激光器。

1976年，美国亚特兰大将镓铝砷激光器作为光源，多模光纤作为传输介质，以 44.7 Mbit/s 的传输速率成功地将信息传输了 10 km ，成功实现了世界第一个实用光通信系统的现场试验。随后其他发达国家也进行了类似的试验，并获得了光通信的相关实践经验。1988年，美、日、英、法发起了第一条横跨大西洋的海底光缆光通信系统，全长共 6400 km 。现在光纤通信系统已遍布世界。

在现代光通信系统中，对光通信用的光源有一些基本的要求，只有满足了这些要求的光源才有资格成为光通信用的光源。具体要求如下：

(1) 光源的发光波长必须和光纤的低损耗波长 $1.3\text{ }\mu\text{m}$ 和 $1.5\text{ }\mu\text{m}$ 相一致。

(2) 光源的输出功率必须合适，入纤功率为数十微瓦到数毫瓦之间，这样才能满足不同通信距离的需要。

(3) 光源应具有非常强的耐用性，其使用寿命要在 10 万 h 以上，否则会因频繁更换光源而降低光通信系统的可靠性。

(4) 光源的谱线宽度要尽可能窄，这有利于减少光纤的材料色散，增大系统的传输容量。

(5) 光电转换效率要尽可能高，否则会因效率太低而导致器件发热严重，不仅增加损耗，还会缩短光源的使用寿命。

(6) 光源应便于调制，调制速率应能适应系统的要求。

(7) 光源应体积小，重量轻，便于安装和使用。

目前，市场上使用的光源绝大部分都是半导体激光器 (LD) 和半导体发光二极管 (LED)。由于 LD 价格昂贵，考虑到成本的因素，LED 成为光纤通信系统的主要光源。

1.4 光纤通信系统的发展

光纤通信系统出现于 20 世纪 60 年代，到现在已有将近 60 年的历史了，在这段发展过程中，光纤通信系统的发展经历了 5 代。

第一代光纤通信系统 (1966—1976)：以 $0.85\text{ }\mu\text{m}$ 的工作波长为主，传输介质以采用多模光纤为主，光源主要是 GaAs 半导体激光器，传输速率达到 45 Mbit/s ，最大中继间距达 10 km 。到了 20 世纪 70 年代后期，人们发现 $1.3\text{ }\mu\text{m}$ 附近的光波在光纤通信系统中的损耗要小于 1 dB/km ，并且有非常小的色散，这样光波传输的距离就要大很多，为此，针对工作波长为 $1.3\text{ }\mu\text{m}$ 的光纤通信系统的研发开始火热起来。

第二代光纤通信系统 (1976—1986)：以 $1.31\text{ }\mu\text{m}$ 的工作波长为主，传输介质以采用单模光纤为主，光源主要是 InGaAsP 半导体激光器，色散小，传输速率达到 1.7 Gbit/s ，最大中继间距超过 20 km 。然而此时，人们通过理论研究发现光纤最小损耗可低至 0.5 dB/km ，且光纤的最小损耗在 $1.55\text{ }\mu\text{m}$ 附近，为此，针对工作波长为 $1.55\text{ }\mu\text{m}$ 的光纤通信系统的研发开始火热起来。

第三代光纤通信系统 (1986—1996)：以 $1.55\text{ }\mu\text{m}$ 的工作波长为主，传输介质以采用单模光纤为主，光源主要是 InGaAsP 半导体激光器，光纤损耗最低可到 0.2 dB/km ，传输速率达到

4 Gbit/s。在使用该系统时，由于 InGaAsP 半导体激光器是多纵模激光器，这样通信系统的使用就受到色散的限制。后来设计出了在 1.55 μm 附近具有最小色散的色散位移光纤（DSF），并且使用单纵模半导体激光器，成功地解决了这个问题，该种通信系统的无中继距离达到 90 km，并且通信系统数据传输速率达到 2.5 Gbit/s。随后，由于激光器的设计水平的提高，可使光接收机的数据传输速率达到 10 Gbit/s。

第四代光纤通信系统（1996—2003）：以引入光放大器为标志，特别是工作在 1.55 μm 附近的掺铒光纤放大器（EDFA）。同时还出现了波分复用（WDM）技术，这使光纤通信系统的传输容量得到了巨大的提高。

第五代光纤通信系统（2003 至今）：进入 21 世纪以来，由于多种先进的调制技术、超强 FEC 纠错技术、电子色散补偿技术等一系列新技术的突破和成熟，以及有源和无源器件集成模块的大量问世，出现了以 40 Gbit/s 和 100 Gbit/s 为基础的波分复用系统的应用。

总而言之，光纤通信已成为所有通信系统中的最佳技术选择。光纤通信系统的发展经历了由多模到单模；由 0.85 μm 光源到 1.3 μm 和 1.55 μm 的光源；传输速率为几十兆比特每秒到太比特每秒量级；由长途干线推广到用户接入网；由单一类型信息传输到多业务传输的历程。

光通信自诞生到发展经历了两千多年的历史，目前，传输速率为几十吉比特每秒的系统已经实用化并得到了大量的应用，形成了遍布全世界的陆地与海底光纤网。光通信主要发展历程如表 1.1 所示。

表 1.1 光通信主要发展历程

年 代	发 展
古代光通信	军用烽火台、信号灯、航标灯
1880 年	光电话的发明，开启了光通信的序幕
20 世纪 60 年代	世界第一台红宝石激光器诞生；进行了透镜阵列传输光的实验；研制出氦-氖（He-Ne）气体激光器和砷化镓半导体激光器；英籍华人高锟就光纤传输的前景发表了具有历史意义的论文
20 世纪 70 年代	成功研制损耗 20 dB/km 的石英光纤；研制成室温下连续振荡的 GaAlAs 双异质结半导体激光器
20 世纪 80 年代	传输速率得到大幅提高；传输距离得到大幅增加；光纤通信在海底通信获得应用
20 世纪 90 年代	掺铒光纤放大器的应用迅速得到了普及，波分复用系统实用化
21 世纪以来	先进的调制技术、超强 FEC 纠错技术、电子色散补偿技术等一系列新技术的突破和成熟

未来，光纤通信的研究热点将是超大容量的波分复用光纤通信系统、超长距离光孤子通信系统、宽带光放大器等。

1.5

光纤通信的优点和应用

在早期通信中，使用的大多是微波通信，微波的波长范围一般在 0.001~0.1 m 之间，因此其对应的频率范围在 3~300 GHz 之间。而光纤通信系统使用的载波波长在 0.7~1.7 μm 之间，与此对应的频带宽度约为 200 THz。现在光纤通信系统使用的光源基本都处在 1.31~1.55 μm 之间，其对应的频带宽度约为 20 THz。由此可以看出，光纤通信用的近红外光波比微波的频带宽度高 3 个数量级以上。电磁波光谱图如图 1.7 所示。

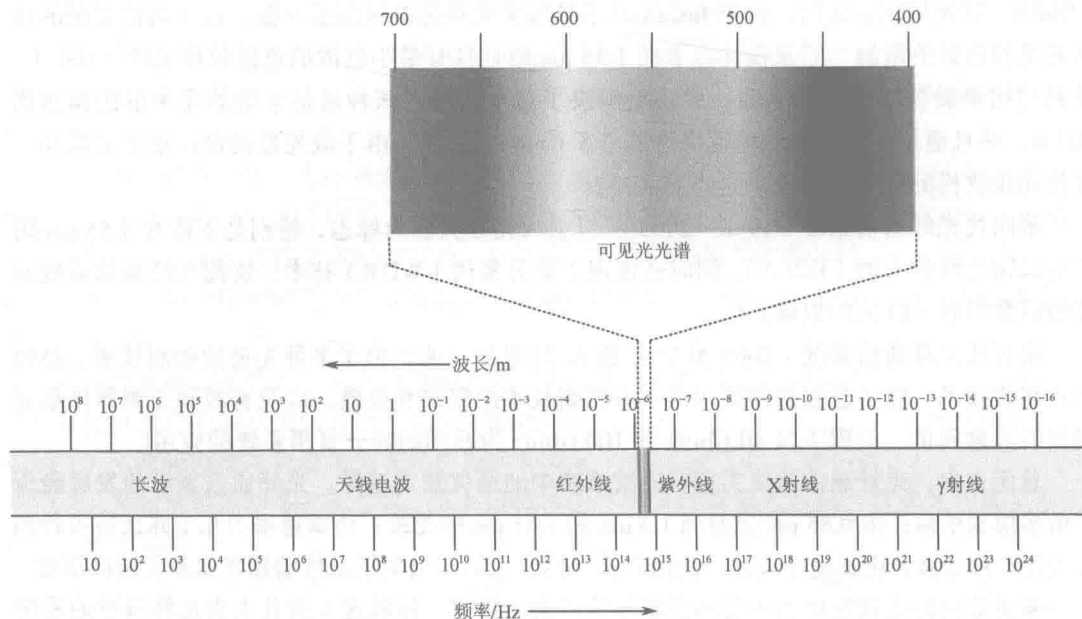


图 1.7 电磁波光谱图

光纤作为传输介质，它不仅可以解决通信带宽问题，而且可以解决光传输损耗问题，因此光纤的应用前景非常理想。总的来讲，光纤作为光传输介质，它具有的优点如下：

(1) 传输频带宽，传输容量大。

光纤能提供的带宽大于 100 GHz，目前单波长光纤通信系统的传输速率一般为 2.5 Gbit/s 和 10 Gbit/s，采用外调制技术时，传输速率可达到 40 Gbit/s。当采用波分复用 (WDM) 和时分复用 (TDM) 技术时，其传输容量更是得到了极大的提高。

(2) 光损耗小，中继距离长，误码率小。

随着制作工艺的不断提高，石英光纤在 1.31 μm 处的光损耗接近 0.5 dB/km，在 1.55 μm 处的光损耗接近 0.2 dB/km，而且这样的损耗特性在几百吉赫兹的宽频带范围内基本不变。同轴电缆的损耗会随频率的改变而改变。例如，一种典型的传输电视信号的同轴电缆，50 MHz 对应的损耗为 20 dB/km，200 MHz 对应的损耗是 50 dB/km，500 MHz 对应的损耗是 100 dB/km。因此，传输容量大，误码率低，传输距离长，使光纤通信系统适合长途干线网，同时也适合接入网的使用。

(3) 重量轻，体积小，寿命长，成本低。

光纤具有重量轻、体积小、寿命长、成本低等优点。这一点对于飞机、导弹等军事领域用处巨大，因为使用光纤可以大幅度减小它们的质量。一般光纤的预计使用寿命为 20~30 年，而传统的电缆的使用寿命为 12~15 年，主要原因是玻璃不会像金属那样容易腐蚀。而光纤制作使用的主要材料在地球上含量非常丰富，因此制作光纤的成本很低。

(4) 抗电磁干扰性能好，对温度、腐蚀性液体或气体的耐抗性强。

光纤由电绝缘的石英材料制成，因此光纤通信系统不受各种电磁干扰，也不会受到闪电雷击的损坏，并且非常适用于强电磁干扰的高压电力周围，同时也适合在油田、煤矿等易燃易爆环境中使用。

(5) 光纤泄漏少，保密性好。

随着社会的发展，人们对重要信息的保密性要求越来越高，而传统的有线通信和无线通信的保密性都不是很好。对于光纤来讲，光波在光纤中传输时，将会被限制在光纤内部，而不会泄漏出光纤外，即使在转弯处，弯曲半径较小时，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了，为此，要想从光纤外面窃取传输的信息就不可能存在了。另外，由于不会出现漏光现象，在包含多根光纤的电缆中出现串话现象就基本不存在了，同样也不会对其他设备造成干扰。

(6) 光纤制造材料丰富。

制造同轴电缆和波导管的铜、铝、铅等金属材料在地球上的含量有限，而制造光纤的石英材料在地球上含量丰富，基本上是取之不尽的材料。大量使用石英光纤替代地球上稀缺的金属材料，这一点不仅体现在经济上，同时也是国家可持续发展的需要。

中国经过了几十年的光纤通信系统的研究与发展，已经基本通达了每个城市。在这几十年的发展过程中，也造就出了具备非常强竞争力的国际性光纤通信系统的生产商和运营商。我国光纤通信具体发展轨迹如表 1.2 所示。

表 1.2 我国光纤通信具体发展轨迹

年 代	发 展
1974 年	开始了光纤通信的基础研究
20 世纪 70 年代末	光纤通信系统现场试验
20 世纪 80 年代	完成了武汉市话中继实用化工程，武汉—荆州多模光缆 34 Mbit/s 省内干线工程以及合肥—芜湖 140 Mbit/s 单模光缆一级干线工程等
20 世纪 90 年代初期	完成了“八纵八横”国家干线，这些干线主要是采用 PDH 140 Mbit/s 系统，开通 1310 nm 窗口
20 世纪 90 年代末期	逐渐采用了 SDH 622 Mbit/s 和 2.5 Gbit/s 系统，开通 1550 nm 窗口，传输速率开始从 622 Mbit/s 提升到 2.5 Gbit/s
2015 年	我国移动宽带用户占比超过 60%，光纤接入用户数突破 1 亿户

本章小结

本章简要介绍了光通信的发展历史，简述了光传输介质和光源的研究进展。20 世纪到 21 世纪初，光纤通信系统的发展经历了 5 个时代，进入 21 世纪以来，由于多种先进的调制技术、超强 FEC 纠错技术、电子色散补偿技术、波分复用技术等一系列新技术的突破和成熟，以及有源和无源器件集成模块的大量问世，出现了以 40 Gbit/s 和 100 Gbit/s 为基础的 WDM 系统的应用。我国在 20 世纪 90 年代初期开始了光纤通信系统的大量建设，光缆逐渐取代电缆，并完成了“八纵八横”国家干线建设。

思考与练习

1. 古代都有哪些利用光传递信息的例子？请列举。
2. 用光纤进行通信是由谁最早提出的？
3. 列举光纤通信系统相对电缆通信系统的优点。
4. 简述光源、光传输介质的发展历程。
5. 简述我国光纤通信系统的建设现状。

第2章

➔ 光纤与光缆



知识目标

- (1) 掌握光纤的结构和分类。
- (2) 掌握光纤传导光的基本原理。
- (3) 了解单模光纤和多模光纤的各自特点。
- (4) 掌握光缆的种类和结构。
- (5) 了解光缆的型号和命名方式。

2.1 光纤发展概述

早期,光通信是穿过空气来传输的,但空气对光传输的干扰非常大。为了避免空气对光传输的干扰,科学家们发明了透镜光波导技术,利用能够反射光信号的管子进行光传输,并在一定距离上设置聚焦透镜,其所起的作用是汇聚散射光和诱导光折射,但该种光传输方式受振动和温度的影响非常严重,从而无法商用。但这种思想启发了后人,从而促使科学家们利用这种思想成功研制出了光导纤维。1966年,英籍华人高锟用实验证明了利用玻璃可以制作光导纤维,并指出通过改进制作工艺,可以使该种光导纤维的光损耗减小到很小的程度。1970年,美国贝尔实验室、美国康宁玻璃公司和英国电信研究所合作成功研制出了损耗为20 dB/km的光导纤维。随后,各发达国家纷纷开展光纤制作工艺的研究,分别研制出了多组分玻璃光纤、液芯光纤、塑料光纤等光纤,其中利用介质全反射原理导光的石英光纤被广泛采用。

在现代光纤通信中,光纤的衰减是制约光纤发展的最重要因素,各国科学家对此展开了大量研究。1974年,科学家研制出了衰减为2 dB/km的低损耗光纤。1976年,科学家研究发现,当降低玻璃内的OH⁻离子时,可以消除1.3~1.55 μm之间的衰减波峰,如图2.1所示。1979年,1.55 μm波长光纤衰减达到0.2 dB/km,接近理论极限值。随后,科学家又发现当光纤长期与潮气和水接触,会致使部分水气渗入光纤内,造成光纤衰减幅度增大和本身物理强度降低,为了解决这个问题,科学家们提出将油膏注入光纤套管中可以隔绝水气,从而制备出防潮的光纤,克服此类问题。

光纤通信系统的通信容量也是经过一段发展过程才得到非常大的提升。早期使用的是多模(Multi-Mode, MM)光纤,但是光在多模光纤中传输时,由于各模式间存在光程差,从而导致输出的光信号带宽较窄。到了1976年,科学家研制出了渐变型(又称自聚焦型)光纤,此时光纤的传输带宽达到kHz·km的数量级。到了20世纪80年代,科学家研制出了单模(Single-Mode, SM)光纤,其传输带宽增大到10 kHz·km,这使得大容量光通信成为可能。

随后，科学家研制出了波长为 $1.55\text{ }\mu\text{m}$ 的零色散光纤，这使得长距离超大容量光纤传输得到商用。

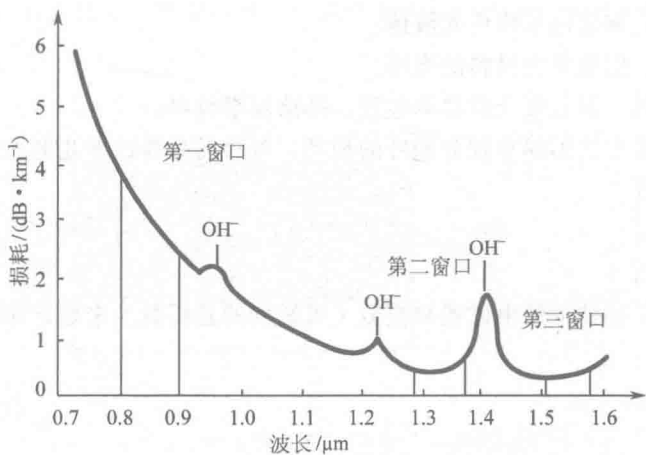


图 2.1 光纤 OH^- 离子造成的衰减峰值

光纤的发展离不开光源的发展。早期，使用的是输出波长为 $0.85\text{ }\mu\text{m}$ 的注入式镓铝砷（GaAlAs）半导体激光器作为光源，该类激光器使用寿命较短。后来又相继研制出了可连续运行的 GaAlAs 双异质结注入式激光器、GaAlAs 发光二极管（LED）等寿命长、价格低、谱线宽、速率低和功率小的商用化激光器。随之，工作波长为 $1.3\text{ }\mu\text{m}$ 和 $1.55\text{ }\mu\text{m}$ 的激光器被研制出来并得到大范围使用。

2.2 光纤分类和结构

在实际使用中，会根据不同的环境使用不同的光纤，因此现在光纤的种类比较多。同时，不同参数的光纤其结构也会有所不同。下面将从光纤分类和结构两方面来介绍各种光纤。

2.2.1 光纤分类

光纤由折射率较高的纤芯和折射率较低的包层组成，在包层外面加上塑料护套，其典型结构图如图 2.2 所示。

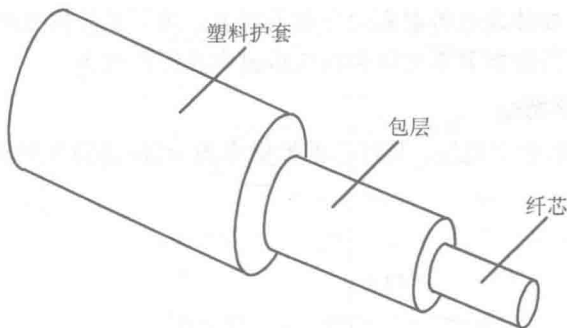


图 2.2 光纤的典型结构

如果按材料的不同来划分光纤的种类，可将其分为以下几类：