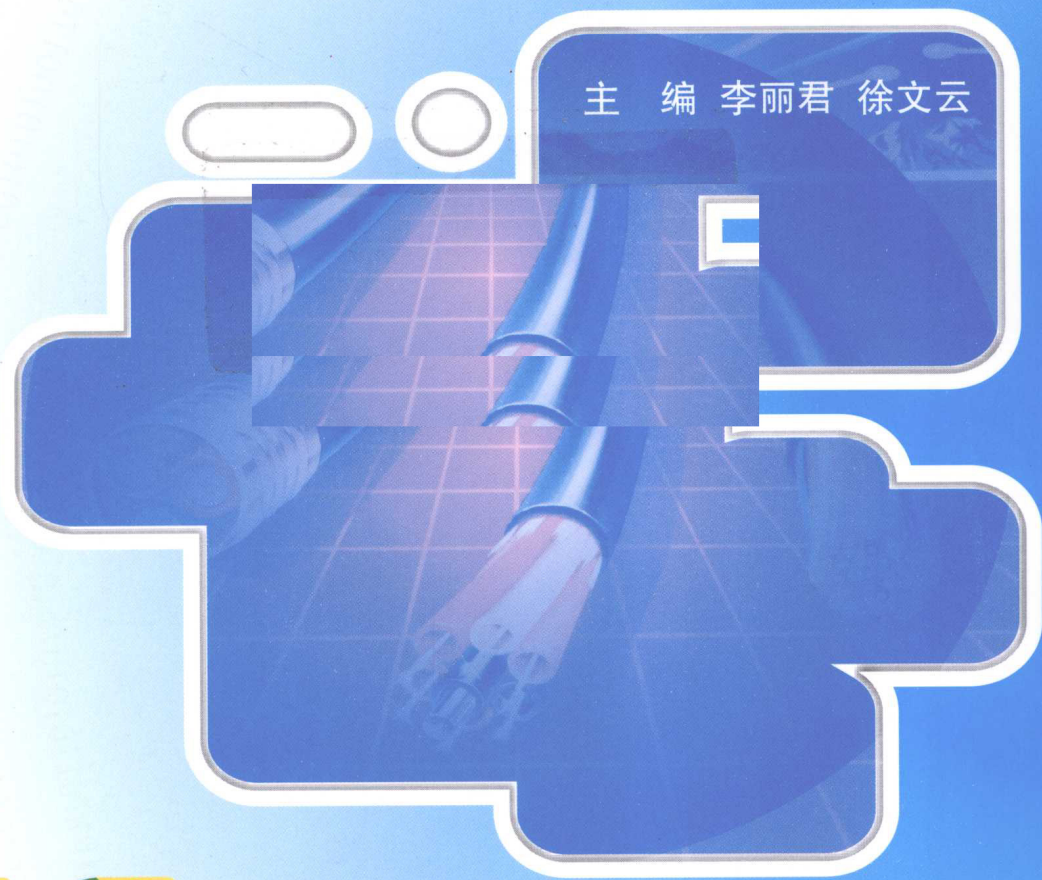




21世纪全国本科院校电气信息类**创新型**应用人才培养规划教材

光纤通信

主 编 李丽君 徐文云



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

21 世纪全国本科院校电气信息类创新型应用人才培养规划教材

光 纤 通 信

主 编 李丽君 徐文云
副主编 姚 军
参 编 丁庆安



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

内 容 简 介

本书从当前的教学改革出发,以开拓学生的视野为目标,在注重培养学生学习工程理论兴趣的同时,还特别注意对学生的人文关怀,循序渐进地阐述光纤通信的基础理论和新知识、新技术。恰当的导入案例和阅读材料增强了本书的可读性,用物理概念对理论结果加以解释降低了本书的学习难度,丰富的习题题型强化了书中的知识点。

本书适用面较广,可作为电气信息类相关专业的本科生和工科类其他各专业的教材,还可作为从事光纤通信系统设计和应用的技术人员学习、工作的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

光纤通信/李丽君,徐文云主编. —北京:北京大学出版社,2010.9

(21世纪全国本科院校电气信息类创新型应用人才培养规划教材)

ISBN 978-7-301-17683-2

I. ①光… II. ①李… ②徐… 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(2010)第 163776 号

书 名: 光纤通信

著作责任者: 李丽君 徐文云 主编

策 划 编 辑: 姜晓楠 程志强

责 任 编 辑: 姜晓楠

标 准 书 号: ISBN 978-7-301-17683-2/TN·0061

出 版 者: 北京大学出版社

地 址: 北京市海淀区成府路 205 号 100871

网 址: <http://www.pup.cn> <http://www.pup6.com>

电 话: 邮购部 62752015 发行部 62750672 编辑部 62750667 出版部 62754962

电 子 邮 箱: pup_6@163.com

印 刷 者: 北京中科印刷有限公司

发 行 者: 北京大学出版社

经 销 者: 新华书店

787 毫米×1092 毫米 16 开本 14.25 印张 340 千字

2010 年 9 月第 1 版 2010 年 9 月第 1 次印刷

定 价: 26.00 元

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,侵权必究

举报电话: 010-62752024

电子邮箱: fd@pup.pku.edu.cn

前 言

2009 年度的诺贝尔物理学奖授予被冠以“光纤之父”称号的华人高锟，耶鲁大学校长在授予他“荣誉科学博士学位”的仪式上说：“你的发明改变了世界通信模式，为信息高速公路奠下基石。”

自 1966 年，高锟先生首次提出当玻璃纤维的衰减率低于 20dB/km 时，光纤通信即可成功，1960 年世界上第一台红宝石激光器研制成功，1970 年康宁公司生产出世界上第一根低损耗光纤以来，光纤通信已经从一个研究热点成为强大的商业实体。光纤通信已成为现代通信的主要支柱之一，在现代电信网中起着举足轻重的作用，与现存的铜线应用及无线通信系统共同构建了目前的信息基本构架。

光纤通信具有广泛的应用领域，主要用于市话中继线、长途干线通信、全球通信网、各国的公共电信网(如我国的国家一级干线、各省二级干线和县以下的支线)，还用于高质量彩色电视传输、工业生产现场监视和调度、交通监视控制指挥、城镇有线电视网、光纤局域网，以及其他如在飞机内、舰艇内、矿井下、电力部门、军事、有腐蚀和辐射等特殊场合中使用。

目前，以光纤通信为题材的书籍很多，本书在试图降低难度的同时，尽可能省略冗长的数学推导过程，用物理概念对理论结果加以解释。本书的内容既注重新知识、新技术的展现，又注重将基础知识用清晰简洁的物理概念加以说明。面对未来无止境的通信带宽需求，本书的内容仍具有参考和实用价值。

本书可作为电气信息类相关专业本科学生的教材，也可供研究生选读。本书的原稿是以我们多年从事光纤通信课程的讲稿为基础写成的，本课程的参考学时是 $40\sim 60$ 学时。本书共分 6 章：第 1 章“概述”，介绍了光纤通信系统及其关键技术，同时介绍了光纤通信的整个发展历程；第 2 章“光纤传输理论”；第 3 章“光源与光发送机”，从光与物质相互作用基础入手，概括了激光器的基本结构和产生激光的条件，然后介绍了光源的调制方式和光发送机的结构和特性；第 4 章“光检测器与光接收机”，说明了光检测器的工作原理和结构、光接收机的结构和特性，并分析了光纤通信中的码型；第 5 章“光纤通信系统与通信网”，主要介绍了光纤通信网络中的无源光器件、光放大器、SDH 技术和光纤通信系统设计等技术；第 6 章“光缆的接续与测试”，介绍了光缆的结构和种类，讨论了工程实践中光纤接续的方式、光纤熔接机结构及一些实用的光纤测量技术等。

本书由李丽君、徐文云任主编，姚军任副主编。第 1~3 章由李丽君编写，第 4、6 章由徐文云编写，第 5 章由姚军编写。丁庆安参与了第 3 章第 6 节的编写工作。乔秋晓、曹莹为打印和校对书稿做了许多工作。在此一并表示感谢。

由于编者水平有限，书中难免存在一些缺点和错误，殷切希望广大读者批评指正。

李丽君

2010 年 6 月

目 录

第 1 章 概述 1

1.1 光纤通信系统及其关键技术 2

1.1.1 光纤通信的概念及当前

光纤通信基本系统 2

1.1.2 光纤通信关键技术 4

1.2 光纤通信技术优缺点 7

1.3 光纤通信的发展历程 9

1.3.1 光通信技术的逐年进步 ... 9

1.3.2 光纤通信的发展

现状及展望 11

小结 15

习题 15

第 2 章 光纤传输理论 17

2.1 光纤的基本概念 19

2.1.1 光纤的结构 19

2.1.2 光纤的分类 19

2.1.3 光纤中的光传输 21

2.2 基本波导方程 23

2.2.1 波动方程 24

2.2.2 亥姆霍兹方程 24

2.2.3 基本波导方程概述 25

2.3 阶跃折射率光纤的模式理论 26

2.3.1 圆柱坐标系中的

波导方程 26

2.3.2 纤芯中的场分布 27

2.3.3 包层中的场分布 29

2.3.4 截止频率的计算式 30

2.3.5 能够在光纤中存在的

导模及其特征方程 31

2.3.6 各模式的截止频率及光纤的

单模条件 32

2.3.7 LP 模 35

2.4 单模光纤 38

2.4.1 单模光纤如何工作 38

2.4.2 衰减 40

2.4.3 色散和带宽 41

2.5 渐变折射率光纤的近似分析 43

2.6 光纤的非线性效应 47

2.6.1 非线性效应的产生 47

2.6.2 受激散射 49

2.6.3 非线性效应的重要性 55

小结 59

习题 59

第 3 章 光源与光发送机 61

3.1 光与物质相互作用的基础 62

3.1.1 光的波动理论与

光子学说 62

3.1.2 固体的能带 64

3.2 激光器工作原理 66

3.2.1 光与物质相互作用的

三个过程 66

3.2.2 介质中的光增益 68

3.2.3 光在介质中的吸收和

放大 69

3.2.4 光学谐振腔 71

3.2.5 光谱线形状和宽度 72

3.2.6 阈值条件 73

3.2.7 激光器的振荡模式 75

3.3 半导体物理基础及半导体

激光器 76

3.3.1 半导体的导电机构与

能带图 77

3.3.2 半导体产生光增益的

条件 78

3.3.3 P-N 结 80

3.3.4 半导体激光器	83	4.4 误码率和灵敏度的计算	130
3.4 通信中常用光源及其工作特性	88	4.4.1 误码率的计算	130
3.4.1 发光二极管	89	4.4.2 灵敏度的计算	132
3.4.2 半导体激光器的 工作特性	90	4.5 光纤通信中的线路码型	133
3.5 光源的调制	91	4.5.1 码型转换的原因	133
3.5.1 光源的两种调制方式	91	4.5.2 码型应满足的 主要要求	134
3.5.2 光源的直接调制	91	4.5.3 光纤通信中的 常用码型	135
3.5.3 LD 数字调制过程的 瞬态分析	93	小结	139
3.5.4 电光效应	94	习题	139
3.5.5 电光调制	98	第 5 章 光纤通信系统与通信网	141
3.5.6 声光调制	101	5.1 无源光器件和 WDM 技术	143
3.5.7 磁光调制	102	5.1.1 无源光器件	143
3.6 光发射机	103	5.1.2 WDM 光纤传输系统	150
3.6.1 光发射机的功能	103	5.2 光放大器	153
3.6.2 光发射机基本框图	103	5.2.1 半导体光放大器	153
3.6.3 光发送电路基本组成和 主要性能指标	105	5.2.2 掺铒光纤放大器	154
小结	115	5.3 数字光纤通信系统	157
习题	115	5.3.1 数字光纤通信系统的 组成	157
第 4 章 光检测器与光接收机	116	5.3.2 数字光纤通信系统 性能及其测试	159
4.1 光检测器	117	5.4 光同步数字传输网	164
4.1.1 光电二极管的工作原理 和响应波长	117	5.4.1 SDH 的帧结构	164
4.1.2 PIN 光电二极管	119	5.4.2 SDH 的复用映射结构	165
4.1.3 雪崩光电二极管	120	5.4.3 SDH 传送网的 网络结构	166
4.1.4 光检测器的主要参数	121	5.5 光纤通信系统的总体设计	169
4.2 光接收机的组成和 主要性能指标	122	5.5.1 系统的总体考虑	169
4.2.1 光接收机的组成及 各部分功能	122	5.5.2 功率预算和色散预算	172
4.2.2 光接收机的主要性能 指标	126	5.5.3 功率代价因素	174
4.3 光接收机的噪声	127	5.5.4 SDH 自愈环网原理	175
4.3.1 光接收机噪声的来源	127	5.5.5 SDH 网络传输性能	178
4.3.2 光检测器的噪声	128	小结	181
4.3.3 热噪声	129	习题	181
		第 6 章 光缆的接续与测试	183
		6.1 光缆的结构和种类	184

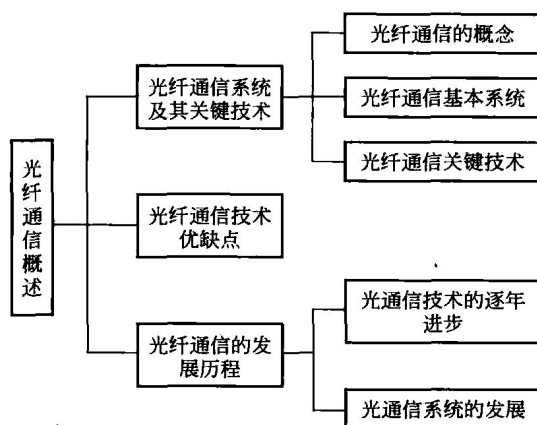
6.1.1 光缆的结构	184	6.5.1 光缆接续的基本要求 ...	201
6.1.2 光缆的种类	185	6.5.2 光缆接续的方法与 步骤	202
6.1.3 光缆的型号和规格	188	6.6 光缆成端	203
6.2 光纤的接续	191	6.6.1 无人中间站的光缆成端 ...	203
6.2.1 光纤接续的方式及要求 ...	191	6.6.2 局内光缆的成端	204
6.2.2 造成光纤接续损耗的 主要因素	192	6.7 光缆的测试	205
6.3 光纤熔接机	194	6.7.1 测试标准及层次	205
6.3.1 光纤熔接机的种类	194	6.7.2 常用测试仪表	206
6.3.2 光纤熔接机的组成	194	6.7.3 损耗测量	208
6.4 光纤的熔接实例	196	6.7.4 色散测量	212
6.4.1 单芯光纤的熔接实例 ...	196	小结	216
6.4.2 多芯带状光纤的 熔接实例	199	习题	216
6.5 光缆的接续	201	参考文献	218

第1章

概述



章节知识框架



教学目标与要求

- (1) 掌握光纤通信的基本概念。
- (2) 了解光纤通信系统的基本组成。
- (3) 了解光纤通信中的关键技术。
- (4) 熟悉光纤通信的特点。
- (5) 了解光通信技术的发展历程。
- (6) 了解光纤通信的发展前景。

光纤的诞生

人们发现了透明度很高的石英玻璃丝可以传光，并把这种玻璃丝称为光学纤维，简称“光纤”。光纤的诞生，和高锟(英籍华人)、美国贝尔研究所、美国康宁玻璃公司的马瑞尔、卡普隆、凯克这些名字是分不开的。20世纪60年代，最好的玻璃纤维的损耗率(以下简称“损耗”)在1 000dB/km以上，其含义就是信号传送1km后只剩下初始能量的百亿分之一了($1/10^{10}$)，这是无论如何也无法用于通信的。因此，当时有很多科

学家对玻璃纤维通信失去了信心，放弃了光纤通信的研究。就在这种情况下，出生于我国上海的英籍华人高锟(K. C. Kao)博士，通过在美国标准电信实验室所作的大量研究的基础上，在1966年7月，就光纤传输的前景发表了具有重大历史意义的论文。论文分析了玻璃纤维损耗的主要原因，预言只要能设法降低玻璃纤维的杂质，就有可能使光纤的损耗从1 000dB/km降低到20dB/km。终于，在1970年，美国康宁玻璃公司的三名科研人员马瑞尔、卡普隆、凯克成功地制成了传输损耗只有20dB/km的光纤。

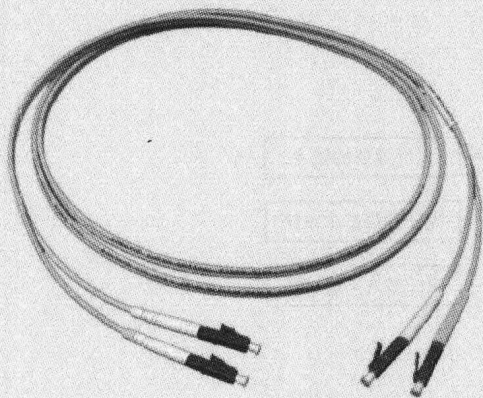


图 1.0 光纤实物外形

光纤实物外形如图 1.0 所示。

伴随1970年激光器关键技术的重大突破，使光纤通信开始从理想变成可能。1974年美国贝尔研究所发明了低损耗光纤制作法——CVD法(汽相沉积法)，使光纤损耗降低到1dB/km；1977年，贝尔研究所和日本电报电话公司几乎同时研制成功寿命达100万小时(10^6 h)的半导体激光器，从而有了真正实用的激光器。1977年，世界上第一个光纤通信系统在美国芝加哥市投入商用，数据传输速率(以下简称“速率”)为45Mb/s。那么现在的光纤通信又发展到什么样子了呢？未来还有哪些工作需要人们去探索和完成呢？通过本书的学习，您会得到答案的。

1.1 光纤通信系统及其关键技术

1.1.1 光纤通信的概念及当前光纤通信基本系统

光纤通信，顾名思义，就是利用光波作为信息的载波信号来进行的通信。光波是一种电磁波，占整个电磁波谱中的一部分。光纤通信中的光波不仅包括为肉眼所见的可见光，而且包括红外线在内的整个部分。图 1.1 所示为通信波段电磁波谱及各波段传输介质，光波的波长比微波更短，频率比微波更高，因此，为了提高信息的传输速度和容量，从电通信中的微波通信向光纤通信方向发展是一种必然趋势。

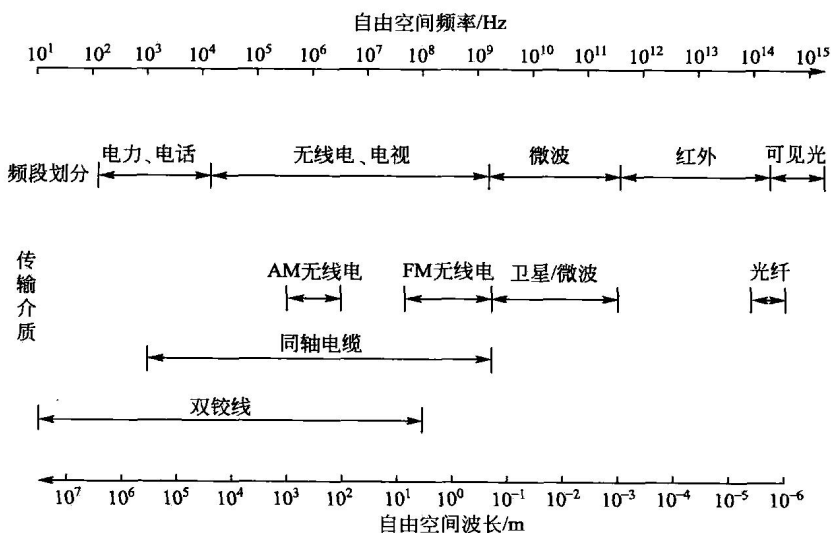


图 1.1 通信波段电磁波谱及各波段传输介质

光纤通信的传输介质(又称传输媒体)可以是大气或真空也可以是光纤或光波导。光纤通信属于有线光通信,概括起来,光纤通信是利用近红外线区域波长 $1\mu\text{m}$ 左右的光波作为信息的载波信号,把电话、电视、数据等电信号调制到光载波上,再通过光导纤维(简称光纤)传输信息的一种通信方式。

目前,全光通信技术尚未成熟,典型的点到点光纤通信系统如图 1.2 所示,主要包括收/发信电端机、光发送/接受端机和传输光纤等几部分组成,若干个点到点通信系统组合就构成通信网。

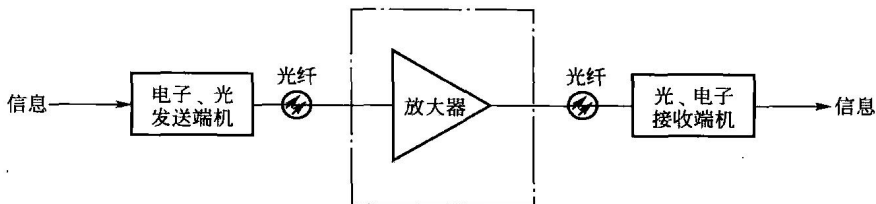


图 1.2 当前典型的点-点光纤通信链路的基本框图

信息包括语音、图像、数据等所有信号源,经电、光发送端机对信号进行处理将信号转变成适合于在光纤上传输的光信号,经光纤传输,在长途光纤通信系统中,每隔一段距离需设置中继器,把经过长距离传输衰变的微弱并畸变的光信号进行放大整形再生后继续传输。而光、电学接收端机则接收光信号,并从中提取信息,然后转变成电信号,最后得到对应的语音、图像、数据等信息。

1. PCM 电端机

光纤传输系统是数字通信的理想通道,数字信号是对连续变化的模拟信号进行采样(又称抽样,取样)、量化和编码产生的,称为 PCM(Pulse Code Modulation),即脉冲编

码调制。这种电的数字信号由 PCM 电端机产生。

2. 光发射端机

电端机的输出信号,通过光发射机的输入端口接入光发射机。光发射机主要由光源、驱动器和调制器等组成,可以将来自于电端机的电信号对光源发出的光波进行调制,成为已调光波,然后再将已调的光信号耦合到传输光纤或光缆中。

3. 光纤或光缆

光纤或光缆构成光的传输通道,其功能是将光发射端机发出的已调制光信号传输给接收端的电接收端机,完成信息传输任务。

4. 中继器

在长途光纤通信线路中,由于光纤的损耗和色散等会造成信号的幅度衰减和波形失真,这些衰减和失真随着信号传输距离的延长而增加,因此,每隔一定距离(一般为 50~70km)就要设置一个中继器。

5. 光接收端机

光接收端机主要由光检测器和放大器组成。其功能是将光纤或光缆传输来的光信号,经光检测器转换为电信号,然后,将这微弱的电信号经放大电路放大到足够的电平后,再传送给接收端的电端机。

6. 电接收端机

电接收端机的任务是将高速数字信号解复用,然后再还原成语音、图像、数据等信号,送给用户。

7. 光纤连接器、耦合器等无源器件

在光纤通信系统中光纤与光纤、光纤与光端机的连接耦合以及各路信号的分/合等,都需要使用光纤连接器、耦合器等无源器件。

8. 备用系统与辅助系统

为了确保系统的畅通,通常应设置备用系统,当主系统出现故障时,可人工或自动切换到备用系统上工作,这样就可以保障通信的畅通和正确无误。

辅助系统包括:监控管理系统、公务通信系统、自动倒换系统、告警处理系统、电源供给系统等。

1.1.2 光纤通信关键技术

目前,光纤通信已经广泛应用到长途骨干网、城域网和接入网中,在现代电信网中,光纤通信作为现代通信的重要手段之一起着关键的作用。就光纤通信技术本身而言,主要包括:光纤光缆技术、传输技术、光有源器件、光无源器件以及光网络技术等。

1. 光纤光缆技术

光纤技术的进步主要包括两个方面:一是通信系统所用的光纤;二是特种光纤。早期



光纤的传输窗口只有三个,即 850nm(第一窗口)、1 310nm(第二窗口)和 1 550nm(第三窗口)。近几年相继开发出第四窗口(L 波段)、第五窗口(无水峰的全波光纤)以及 S 波段窗口。这些传输窗口开发成功的巨大意义就在于从 1 280~1 625nm 的广阔的光频范围内,都能实现低损耗、低色散传输,使通信系统传输容量几百倍、几千倍甚至上万倍的增长。另一方面是特种光纤的开发及其产业化,这是一个相当活跃的领域。特种光纤主要有包括以下几种。

1) 有源光纤

有源光纤主要是指掺有稀土离子的光纤。如掺铒(Er^{3+})、掺铌(Nb^{3+})、掺镨(Pr^{3+})、掺镱(Yb^{3+})、掺铥(Tm^{3+})等,以此构成激活物质,这是制造光纤放大器和光纤激光器等光纤有源器件的核心物质。掺杂不同稀土离子的有源光纤应用于不同的工作波段器件的制作,如掺铒光纤放大器(EDFA)主要应用于 1 550nm 附近(C、L 波段)、掺镨光纤放大器(PDFA)主要应用于 1 310nm 波段;掺铥光纤放大器(TDFA)主要应用于 S 波段等。这些掺杂光纤放大器与拉曼(Raman)光纤放大器一起给光纤通信技术带来了革命性的变化。掺杂光纤放大器的显著作用是可以直接放大光信号、延长传输距离,在光纤通信网和有线电视网(CATV 网)中作分配损耗补偿,此外,在波分复用(WDM)系统中及光孤子通信系统中是不可缺少的关键元器件。正因为有了光纤放大器,才能实现无中继器的百万千米的光孤子传输,也正是有了光纤放大器,不仅能使 WDM 传输的距离大幅度延长,而且也使得传输的性能最佳化。

2) 色散补偿光纤(Dispersion Compensation Fiber, DCF)

常规 G. 652 光纤在 1 550nm 波长附近的色散为 $17\text{ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$ 。当速率超过 2.5Gb/s 时,随着传输距离的增加,会导致误码。若在 CATV 系统中使用,会使信号失真。其主要原因是正色散值的积累引起色散加剧,从而使传输特性变坏。为了克服这一问题,必须采用色散值为负的光纤,即将反色散光纤串接入系统中以抵消正色散值,从而控制整个系统的色散大小。这里的反色散光纤就是所谓的色散补偿光纤。在 1 550nm 处,反色散光纤的色散值通常在 $-50 \sim 200\text{ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$ 。为了得到如此高的负色散值,必须将其芯径做得很小,相对折射率差做得很大,而这种作法往往又会导致光纤的衰耗增加($0.5 \sim 1\text{dB}/\text{km}$)。色散补偿光纤是利用基模波导色散来获得高的负色散值,通常将其色散与衰减之比称作质量因数,质量因数当然越大越好。为了能在整个波段均匀补偿常规单模光纤的色散,最近又开发出一种既补偿色散又能补偿色散斜率的“双补偿”光纤(DDCF)。该光纤的特点是色散斜率之比(RDE)与常规光纤相同,但符号相反,所以更适合在整个波形内的均衡补偿。

3) 多芯单模光纤(Multi-Core mono-Mode Fiber, MCF)

多芯单模光纤是一个共用外包层、内含有多个纤芯、而每根纤芯又有自己的内包层的单模光纤。这种光纤的明显优势是成本较低,生产成本较普通的光纤约低 50%。此外,这种光纤可以提高成缆的集成密度,从而也可降低施工成本。

除了以上几种光纤外,近年来还出现了如双包层光纤、光子晶体光纤等特种光纤,这些光纤的出现都为推进光纤技术的发展起到了关键作用。光缆方面的成就主要表现在带状光缆的开发成功及批量化生产。带状光缆是光纤接入网及局域网中必备的一种光缆,目前光缆的含纤数量达千根,有力地保证了接入网的建设。

2. 光有源器件技术

光纤通信系统中光有源器件的研究与开发一直是最为活跃的领域。激光二极管(LD)直接强度调制达到 2.5Gb/s 的速率已经没有问题,但为了提高频率稳定性和在密集波分复用(DWDM)等系统中的一些特殊应用,外调制技术也在不断应用和发展。光电二极管(PIN)和雪崩光电二极管(APD)始终承担着接收机中光电转换的任务,其性能也在不断发展和提高,一般结构的 PIN 和 APD 产品,其相应带宽达到 20GHz 以上没有问题,随着各项技术的发展,结构改进后的 PIN 和 APD 增益带宽可以超过 100GHz。

除此之外,目前在集成器件技术、垂直腔面发射激光器技术、窄带响应可调谐集成光子探测器技术以及基于硅基的异质材料的多量子阱器件与集成等方面也取得了重大成就。

(1) 集成器件,这里主要指光电集成(OEIC),已开始商品化,如分布反馈激光器(DFB-LD)与电吸收调制器(EAMD)的集成,即 DFB-EA,其他发射器件的集成,如 DFB-LD、MQW-LD 分别与 MESFET 或 HBT 或 HEMT 的集成;接收器件的集成主要是 PIN、金属、半导体、金属探测器分别与 MESFET 或 HBT 或 HEMT 的前置放大电路的集成等。

(2) 垂直腔面发射激光器(VCSEL),这种结构的器件已在短波长(ALGaAs/GaAs)方面取得巨大的成功,并开始商品化,在长波长(InGaAsF/InP)方面的研制工作早已开始进行,目前也有少量商品。可以断言,垂直腔面发射激光器将在接入网、局域网中发挥重大作用。

(3) 窄带响应可调谐集成光子探测器,由于 DWDM 光网络系统信道间隔越来越小,甚至到 0.1nm。为此,探测器的响应谱半宽也应基本上达到这个要求。恰好窄带探测器有陡峭的响应谱特性,能够满足这一要求。集 F-P 腔滤波器和光吸收有源层于一体的共振腔增强(RCE)型探测器能提供一个重要的全面解决方案。

(4) 基于硅基的异质材料的多量子阱器件与集成(SiGe/Si MQW),这方面的研究是一大热点。众所周知,硅(Si)、锗(Ge)是间接带隙材料,发光效率很低,不适合做光电子器件,但是 Si 材料的半导体工艺非常成熟。于是人们设想,利用能带剪裁工程使物质改性,以达到在硅基础上制作光电子器件及其集成(主要是实现光电集成,即 OEIC)的目的,这方面已取得巨大成就。在理论上有众多的创新,在技术上有重大的突破,器件水平日趋完善。

3. 光无源器件技术

所谓光无源器件就是指不需要光源和电源提供能量就能正常工作的光学器件,其种类繁多、功能各异,在光通信系统及光网络中发挥着关键作用,如连接光波导或光路,控制光的传播方向,控制光功率的分配,控制光波导之间、器件之间和光波导与器件之间的光耦合、合波与分波、光信道的上/下载与交叉连接等。早期的几种光无源器件已商品化,常用的有光纤活动连接器、光分/合路器、光衰减器和光隔离器等。随着光纤通信技术的发展,相继又出现了许多光无源器件,如环行器、色散补偿器、增益均衡器、光的上/下复用器、光交叉连接器、阵列波导光栅等。这些器件有的还处于研发或试生产阶段,有的已能提供少量商品。按光纤通信技术发展的一般规律来看,当光纤接入网大规模



模兴建时,将大大推进光无源器件技术的发展,这主要是由于接入网的特点所决定的。

4. 光复用技术

光复用技术种类很多,常用的光复用技术包括:时分复用(TDM)技术、波分复用(WDM)技术、频分复用(FDM)技术、空分复用(SDM)技术和码分复用(CDM)技术。其中最为重要的是波分复用(WDM)技术和光时分复用(OTDM)技术。

光复用技术是当今光纤通信技术中最为活跃的一个领域,它的技术进步极大地推动了光纤通信事业的发展,给传输技术带来了革命性的变革。波分复用技术当前的商业水平是 273 个或更多的波长,研究水平是 1 022 个波长(能传输 368 亿路电话),近期的潜在水平为几千个波长,理论极限约为 15 000 个波长(包括光的偏振模色散复用,OPDM)。据 1999 年 5 月多伦多的 Light Management Group Inc of Toronto 演示报导,在一根光纤中传送了 65 536 个光波,把 PC 数字信号传送到 200m 的广告板上,并采用声光控制技术,这说明了密集波分复用技术的潜在能力是巨大的。OTDM 是指在一个光频率上,在不同的时刻传送不同的信道信息。这种复用的速率已达到 320Gb/s 的水平。若将 DWDM 与 OTDM 相结合,则会使复用的容量增加得更大。

5. 光放大技术

光放大器的开发成功及其产业化是光纤通信技术中的一个非常重要的成果,它大大地促进了光复用技术、光孤子通信以及全光网络的发展。顾名思义,光放大器就是放大光信号的器件。在此之前,传送信号的放大都是要实现光电转换及电光转换,即 O/E、E/O 转换。有了光放大器后就可直接实现光信号放大。光放大器主要有三种:光纤放大器、拉曼光放大器以及半导体光放大器。光纤放大器就是在光纤中掺杂稀土离子(如铒、镨、钕等)作为激光活性物质。每一种掺杂剂的增益带宽是不同的。掺铒光纤放大器的增益带较宽,覆盖 S、C、L 频带;掺钕光纤放大器的增益带是 S 波段;掺镨光纤放大器的增益带在 1 310nm 附近。而拉曼光放大器则是利用拉曼散射效应制作成的光放大器,拉曼放大是一个分布式的放大过程,即沿整个线路逐渐放大的,其工作带宽几乎不受限制。半导体光放大器(SOA)一般是指行波光放大器,工作原理与半导体激光器相似,其工作带宽是很宽的,但增益幅度稍小一些,制造难度较大。这种光放大器虽然已实用了,但产量很小。

除此之外,光纤通信技术还有很多其他技术,如光接入技术、孤子复用技术以及光通信路由技术等,这些技术的不断发展和新技术的不断涌现,都极大地提高了光纤通信系统的通信能力,并扩大了光纤通信系统的应用范围。

1.2 光纤通信技术优缺点

现代通信网的三大支柱是光纤通信、卫星通信和无线电通信,而其中光纤通信是主体,这是因为光纤通信本身具有许多突出的优点。

1. 频带宽,通信容量大

光纤可利用的带宽约为 50 000GHz,1987 年投入使用的 1.7Gb/s 光纤通信系统,一

对光纤能同时传输 24 192 路电话, 2.4Gb/s 系统, 能同时传输 30 000 多路电话。它比传统的明线、同轴电缆、微波等要高出几十乃至上千倍以上。一根光纤的传输容量如此巨大, 而一根光缆中可以包括几十根甚至上千根光纤, 如果再加上波分复用技术把一根光纤当作几根、几十根光纤使用, 其通信容量之大就更加惊人了。就单根光纤而言, 采用波分复用(WDM)或光频分复用(OFDM)是增加光纤通信系统传输量最有效的方法。另一方面, 减小光源谱线宽度和采用外调制方式, 也是曾加传输容量的有效方法。实验室里, 传输率达 Tb/s 级的系统已经研制成功。光纤通信巨大的传输能力, 使其成为信息传输的主体。

为了与同轴电缆铜芯比较, 表 1-1 列出早已实现的单一波长光纤通信系统的传输容量和中继距离。

表 1-1 光纤通信与电缆通信传输能力的比较

通信手段	传输容量/(话路/条)	中继距离/km	1 000km 内中继器个数
小同轴电缆	960	50	250
中同轴电缆	1 800	6	166
光缆	1 920	30	33
光缆	14 000(1Gb/s)	84	11
光缆	6 000(455Mb/s)	134	7

2. 损耗低, 中继距离长

由于光纤具有极低的损耗系数(目前商用化石英光纤已达 0.19dB/km 以下), 若配以适当的光发送与光接收设备, 可使其中继距离达数百千米以上。这是传统的电缆(1.5km)、微波(50km)等根本无法与之相比拟的。因此光纤通信特别适用于长途一、二级干线通信。据报道, 用一根光纤同时传输 24 万个话路、100km 无中继的试验已经取得成功。此外, 正在进行的光孤子通信试验, 已达到传输 120 万个话路、6 000km 无中继的水平, 其中由非石英系极低损耗光纤组成的通信系统, 其最大中继距离则可达数千甚至数万千米, 这对于降低海底通信的成本、提高可靠性和稳定性具有特别的意义。

3. 抗电磁干扰

光纤是绝缘体材料, 它不受自然界的雷电、电离层的变化和太阳黑子活动的干扰, 也不受电气化铁路馈电线和高压设备等工业电器的干扰, 还可用它与高压输电线平行架设或与电力导体复合构成复合光缆, 其中光纤(复合)架空地线是光纤与电力传输系统的地线组合而成的通信光缆, 已在电力系统的通信中发挥重要作用。

4. 无串音干扰, 保密性能好

光波在光缆中传输, 很难从光纤中泄漏出来, 即使在转弯处、弯曲半径很小时, 漏出的光波也十分微弱, 若在光纤或光缆的表面涂上一层消光剂效果更好, 这样, 即使光缆内光纤总数很多, 也可实现无串音干扰, 在光缆外面, 也无法窃听到光纤中传输的信息。保密性能好这一点, 对军事、政治和经济都有重要的意义。



5. 光纤线径细、质量轻、柔软

光纤的芯径很细,约为0.1mm,它只有单管同轴电缆的1%;光缆的直径也很小,8芯光缆的横截面直径约为10mm,而标准同轴电缆为47mm。利用光纤这一特点,使传输系统所占空间小,解决地下管道拥挤的问题,节约地下管道建设投资。此外,光纤的质量轻,光缆的质量要比电缆轻得多,例如18管同轴电缆1m的质量为11kg,而同等容量的光缆1m质量只有90g,这对于在飞机、宇宙飞船和人造卫星上使用光纤通信更具有重要意义。还有,光纤柔软可挠,容易成束,能得到直径小的高密度光缆。

6. 光纤的原材料资源丰富,用光纤可节约金属材料

光纤的材料主要是石英(二氧化硅),地球上有取之不尽、用之不竭的原材料,而制造同轴电缆和波导管的铜、铝、铅等金属材料,地球上的储存量是有限的。制造8km管中同轴电缆,1km需要120kg铜和500kg铝;而制造8km光纤只需要320g石英。所以用光纤取代电缆,可节约大量的金属材料,具有合理使用地球资源的重大意义。

当然光纤系统也存在一些不足:

1. 光纤弯曲半径不宜过小

光纤的弯曲半径分为动态弯曲半径和静态弯曲半径,动态弯曲半径是指光纤在运动中的弯曲半径一般是不得小于光缆外径的20倍的;静态弯曲半径是光纤在静止时的弯曲半径一般是光缆外径的15倍。如果光纤弯曲的曲率半径太小,将引起光的传播途径的改变,使光从纤芯渗透到包层,甚至有可能穿过包层向外渗漏。

2. 光纤的切断和连接操作相对复杂

光纤的切断和连接需要使用专用工具来完成,其中还需要运用测试设备进行常规测量;光纤的维修既复杂又昂贵,从事光缆工作的技术人员要通过相应的技术培训并掌握一定的专业技能。

3. 分路和耦合相对麻烦

由于光纤具备一系列优点,所以广泛应用于公用通信,有线电视图像传输,计算机、航空、航天、舰船内的通信控制,电力及铁道通信交通控制信号,核电站通信,油田、炼油厂、矿井等区域内的通信。光纤在经济上也具有巨大的竞争能力,因此其在信息社会中将会发挥越来越重要的作用。

1.3 光纤通信的发展历程

1.3.1 光通信技术的逐年进步

在激光器发明之前,甚至远古时代已有原始的光通信,其原理与现代数字光通信类似,即有光(烟火)代表“1”码,无光(烟火)代表“0”码,如烽火台(烽火台实际上是这种原始光通信中的中继站)、手电筒、海港信号灯通信。烽火台只有1bit码元,谈不上比特率,手电筒、信号灯开关的速率(比特率)每秒也仅有数比特。

现代光通信可以说以激光器的发明为标志,虽然直到现在为止,光通信系统使用的光源仍然有用非激光光源(发光二极管)的。

20 世纪 60 年代初激光器被发明(开始是固体激光器,后来有气体激光器,半导体激光器等)。有了激光器以后,人们开始了利用激光器作光源进行光通信的研究,这是现代光通信与原始光通信的分界线。通信容量(速率)仍是关键问题。有了激光器,数据传输速率不是每秒比特,而是每秒吉(千兆)比特(1Gb/s),或每秒 10 吉(万兆)比特(10Gb/s)、40Gb/s,甚至更高。

20 世纪 60 年代到 70 年代初,人们主要研究大气光通信。光源主要使用 CO_2 激光器。由于空气不是理想的光传输介质,受空气中的水汽(雾)、雨雪和灰沙的影响,光信号被散射、吸收,以致传输距离很短,在恶劣气候的条件下,光仅能传播百米量级。

大气光通信虽然在机动性、灵活性方面具有优势,适合于大气层视距范围、星际之间、水下等特殊场合的通信,但用于长距离的陆地和海底通信显然不理想。然而光通信的许多优点驱使人们进一步探索光波新的传输介质。

为了克服大气对激光束的影响,人们将光波在大气中的传输转移到地下,如在金属或水泥管道内每隔一段距离安放一个反射镜,通过反射镜的反射使光波限制在管道内向前传输。这种方法虽然克服了大气对激光束的影响,但需要摆放许多反射镜,给实际的施工、维护带来诸多不便,而且每反射一次,光能就损耗一次,经过多次反射之后光能迅速降低,传输距离受到限制。与之类似的方法还有将反射镜换成透镜,这些方法虽然理论上是可行的,但无实际的应用价值。由于光通信在地上(大气光通信)和地下(反射镜传送)都不能理想的传送光波,因而其发展由于传输介质问题而出现了低潮。

光纤通信的实现可以说使光通信柳暗花明。下面所述的两个技术上的突破使光纤通信得以实现,并在以后的时期飞速发展。

1. 光纤损耗的降低

20 世纪 60 年代最低的光纤损耗为 1 000dB/km,即传输 1km,光功率降到原来的 $1/10^{100} \approx 0$,因而这种光纤不可能用作通信介质。高锟博士的贡献在于理论上证明了这样大的损耗是由于光纤中杂质吸收引起的,如将光纤提纯,则损耗可以降到在通信中实用的程度(最初提出的指标是 20dB/km)。

1970 年美国康宁公司首次制成了损耗仅为 20dB/km 的光纤,每传输 1km,光功率降到原来的 $1/100$,可以用作传输介质。此后,光纤损耗逐年下降:1973 年为 4dB/km,1974 年为 2dB/km,1976 年为 0.5dB/km,1979 年为 0.2dB/km。后来又降到 0.16dB/km,几乎达到纯石英光纤损耗的理论极限。

这一突破的意义在于说明光纤可以作为光通信的传输介质,从而为光纤通信打开大门,这也是称高锟博士为“光纤通信之父”的原因。

2. 半导体激光器性能的突破

光源是光通信系统中的关键器件。系统要求该器件线宽窄、可高速调制,而且还要要求体积小、耗电少、寿命长、价格低。现代半导体激光器完全可以满足这些要求。不过通信光源的研究还是经历了一个发展过程。