

新世纪电子信息课程系列规划教材

光纤通信

GUANGXIAN TONGXIN

主 编 钱显毅 张立臣



东南大学出版社
SOUTHEAST UNIVERSITY PRESS

新世纪电子信息课程系列规划教材

光纤通信

主 编 钱显毅 张立臣

东南大学出版社
·南京·

内 容 简 介

本书系统介绍了光纤通信的历史与现状、现代光纤通信技术、光纤传输理论、光纤拉制、光缆设计的基本原则、光发射机组成、光源的调制原理、光接收机、光放大器原理、光纤通信网络、光调节与复用技术、光纤通信系统设计与施工方法、光纤测量技术。

本书编写力求反映应用型本科的要求和理工类专业的教学特点,内容力求由浅入深,循序渐进,基本概念和基础知识准确清晰,光纤通信技术的说明简明扼要,尽量避免繁琐的数学推导,并且注意以形象直观的形式配合文字表述,重点突出。本书每章都附有相关的阅读资料,以帮助读者更多地了解相关知识。

本书可适应不同层次的读者选用,既可用于高等学校理工类本科教材,也适用于各类工程技术人员参考、阅读。

图书在版编目(CIP)数据

光纤通信/钱显毅,张立臣主编. —南京:东南大学出版社,2008.12

(新世纪电子信息课程系列规划教材)

ISBN 978-7-5641-1503-6

I. 光… II. ①钱…②张… 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 195111 号

光 纤 通 信

出版发行 东南大学出版社
出版人 江汉
网 址 <http://press.seu.edu.cn>
电子邮箱 press@seu.edu.cn
社 址 南京市四牌楼 2 号
邮 编 210096
电 话 025-83793191(发行) 025-57711295(传真)
经 销 全国新华书店
印 刷 南京京新印刷厂
开 本 787mm×1092mm 1/16
印 张 21.75
字 数 543 千
版 次 2008 年 12 月第 1 版
印 次 2008 年 12 月第 1 次印刷
书 号 ISBN 978-7-5641-1503-6
印 数 1—3500 册
定 价 44.00 元

本社图书若有印装质量问题,请直接与读者服务部联系。电话(传真):025-83792328

前 言

根据2003年1月教育部在黑龙江工程学院组织召开的全国高等学校教学研究中心“21世纪中国高等学校应用型人才培养体系的创新与实践”课题审定会的有关精神,在原高等学校通用的计算机控制技术的基础上,根据理工类应用型本科专业的特点,编写了《光纤通信》教材。

《光纤通信》主要内容包括四部分:第一部分主要是光纤通信的概念、光纤传输理论、光纤的制造工艺和方法,以及光纤通信的现状与发展方向及其在国民经济中的重要作用;第二部分主要是光发射机、光接收机、光放大器的基础知识、基本原理和应用;第三部分主要是光纤通信网络、光调节技术和复用技术;第四部分主要是光纤通信系统设计与施工以及光纤测量技术。

为了让读者能全面、系统地掌握光纤通信的系统知识,达到教育部对应用型本科的要求,在编写本教材时,根据应用型本科的特点,力求由浅入深,循序渐进,通俗易懂,基本概念和基本知识准确清晰,光纤通信知识的说明简明扼要,尽量避免繁琐的数学推导,着重介绍光纤通信的概念、现代光纤通信技术、光纤传输理论、光纤拉制、设计光缆的基本原则、光发射机组成、光源的调制原理、光接收机和光放大器原理、光纤通信网络、光调节与复用技术、光纤通信系统设计与施工方法、光纤测量技术。本书注意以形象直观的形式配合文字表述,重点突出,以帮助读者掌握关键技术并全面理解本书内容。

本书每章都附有相关的阅读材料,以帮助读者更多地了解相关知识。

本书由钱显毅、张立臣主编,俞伟钧、黄文生、何一鸣、彭颖任参编。本书由钱显毅统稿。

本书在编写过程中得到了南京邮电大学王洪生老师的大力支持和帮助,在此表示感谢。

为了方便教师教学和与作者交流,本书作者将向使用该教材的教学单位提供PPT及相关教学资料,联系方式:qianxy@czu.cn。

由于作者水平有限,书中难免有错误或不足之处,敬请广大读者批评、指正。

编者

2008年8月

目 录

■ 概论	(1)
1.1 光纤通信的概念	(1)
1.1.1 光纤通信	(1)
1.1.2 光纤通信系统	(2)
1.2 光纤通信的发展历史	(3)
1.2.1 光纤通信的里程碑	(3)
1.2.2 光纤通信的爆炸性发展	(5)
1.3 现代光纤通信技术	(6)
1.3.1 光纤通信技术的特点	(6)
1.3.2 现代光纤通信技术的发展趋势	(7)
1.4 数字光纤通信系统与模拟光纤通信系统的比较	(8)
阅读资料 1:我国光纤光缆及光无源器件产业的现状与发展	(9)
阅读资料 2:信息社会	(12)
习题	(12)
■ 光纤传输理论	(13)
2.1 光纤的典型结构和分类	(13)
2.1.1 光纤的典型结构	(13)
2.1.2 光纤的分类	(14)
2.2 光纤的传输特性和主要参数	(15)
2.2.1 光在光纤中的传输	(15)
2.2.2 光纤的损耗特性	(19)
2.2.3 光纤的色散特性	(22)
2.3 阶跃折射率光纤的模式理论	(29)
2.3.1 矢量解法	(30)
2.3.2 标量近似解法	(41)
2.4 渐变折射率光纤的波动理论	(48)
2.4.1 抛物线型折射率光纤的标量近似解法	(49)
2.4.2 渐变折射率光纤的相位积分解法	(53)
2.5 单模光纤	(63)

2.5.1	阶跃折射率单模光纤的结构	(63)
2.5.2	阶跃折射率单模光纤中的模式及其场量	(64)
2.5.3	实际(阶跃折射率)单模光纤的等效近似分析	(66)
2.5.4	单模光纤的色散	(69)
2.6	光纤的制造	(74)
2.6.1	预制棒的制造	(74)
2.6.2	光纤的控制	(75)
2.6.3	光纤的涂敷	(75)
2.7	光纤的成缆	(76)
2.7.1	设计光缆的基本原则	(76)
2.7.2	光缆的典型结构	(76)
2.8	小结	(77)
2.8.1	内容提要	(77)
2.8.2	重点与难点	(78)
2.8.3	重要概念及常用公式	(78)
	阅读资料: 闭路电视监控系统的信号传输方式和设备	(82)
	习题	(90)
	光发射机	(93)
3.1	激光基础知识	(93)
3.1.1	原子的能级和晶体中的能带	(94)
3.1.2	能级的跃迁	(96)
3.1.3	光增益区的形成	(97)
3.2	半导体激光器	(97)
3.2.1	基本原理	(98)
3.2.2	结构理论	(100)
3.2.3	典型分类	(106)
3.2.4	模式概念	(113)
3.2.5	基本性质	(116)
3.3	半导体发光二极管	(122)
3.3.1	工作原理	(122)
3.3.2	结构和分类	(122)
3.3.3	主要性质	(123)
3.4	光源的调制原理	(124)
3.4.1	光源的调制方式	(124)
3.4.2	光源的直接调制	(125)
3.4.3	激光器数字调制过程的瞬态分析	(126)
3.4.4	光源的间接调制	(130)
3.5	光发射机和外调制器	(131)

3.5.1 激光器的实用组件	(131)
3.5.2 光发射机	(132)
3.5.3 波导调制器和电吸收调制器	(135)
3.6 小结	(136)
阅读资料 1: 空间激光通信技术	(137)
阅读资料 2: 光发射机及其主要性能指标	(139)
习题	(141)

■ 光接收机

4.1 光接收机的组成和性能指标	(142)
4.1.1 光接收机的组成	(142)
4.1.2 光接收机的性能指标	(143)
4.2 光电检测器	(144)
4.2.1 PN 结的光电效应	(144)
4.2.2 PIN 光电二极管	(145)
4.2.3 雪崩光电二极管	(149)
4.3 放大电路及其噪声	(152)
4.3.1 噪声的数学处理	(152)
4.3.2 放大器输入端的噪声源	(154)
4.3.3 场效应管和双极晶体管的噪声源	(156)
4.3.4 前置放大器的设计	(159)
4.4 光接收机灵敏度的计算	(161)
4.4.1 灵敏度计算的一般公式	(161)
4.4.2 光电检测过程的统计分布和灵敏度的精确计算	(162)
4.4.3 灵敏度的高斯近似计算	(163)
4.4.4 S. D. Personick 高斯近似计算公式	(165)
4.5 光接收机的组成模块	(173)
4.5.1 码间干扰问题和均衡滤波电路	(173)
4.5.2 接收机的动态范围和自动增益控制电路	(176)
4.5.3 再生电路	(178)
4.6 小结	(181)
阅读资料: 常用光接收机主要性能参数	(182)
习题	(183)

■ 光源和光放大器

5.1 发光二极管	(185)
5.1.1 发光二极管的原理	(185)
5.1.2 发光二极管的工作特性	(188)

5.2	激光器	(192)
5.2.1	激光器的原理	(192)
5.2.2	半导体激光器	(195)
5.3	光放大器	(204)
5.3.1	半导体光放大器	(205)
5.3.2	掺饵光纤放大器	(206)
5.3.3	掺饵波导光放大器	(207)
5.3.4	拉曼放大器	(207)
5.3.5	光放大器的噪声系数	(210)
5.3.6	光放大器的应用	(210)
5.4	小结	(211)
	阅读资料:常用光放大器主要性能参数	(212)
	习题	(215)
光纤通信网络		(218)
6.1	光纤通信系统	(218)
6.1.1	光纤通信系统的特点和类型	(218)
6.1.2	基本光纤通信系统	(219)
6.1.3	数字光纤通信系统	(223)
6.1.4	光同步数字传输网	(227)
6.1.5	模拟光纤通信系统	(234)
6.1.6	相干光通信	(238)
6.2	全光通信网	(242)
6.2.1	OXC 和 OADM	(242)
6.2.2	WDM 光网络	(246)
6.2.3	光分组交换和光突发交换	(249)
6.3	光纤接入网	(256)
6.3.1	PON 的基本原理	(256)
6.3.2	PON 的传输方式	(257)
6.3.3	PON 的拓扑结构和应用类型	(259)
6.4	色散补偿技术	(261)
6.4.1	光纤通信系统中的色散补偿技术	(261)
6.4.2	预啁啾技术	(262)
6.4.3	利用色散补偿光纤补偿色散	(263)
6.4.4	利用CFBG补偿色散	(266)
6.5	光孤子通信技术	(267)
6.5.1	单模光纤中的孤子	(267)
6.5.2	光孤子通信几个问题的讨论	(269)
	阅读资料 1:下一代光纤网络发展动向	(270)

阅读资料 2:城域网的发展和技术选择	(273)
习题.....	(278)
光调节和复用技术	(279)
7.1 光调制器	(279)
7.1.1 基本概念	(279)
7.1.2 电介质光调制器	(282)
7.1.3 EA 调制器	(283)
7.2 光复用/解复用器.....	(284)
7.2.1 波分复用/解复用器	(284)
7.2.2 复用器/解复用器的串扰	(292)
7.2.3 时分复用/解复用器	(293)
阅读资料:空间光调制器	(297)
习题.....	(299)
光纤通信系统设计和施工	(300)
8.1 数字光纤通信系统性能和测试	(300)
8.1.1 数字光纤通信系统的主要性能指标	(300)
8.1.2 系统传输性能指标的测试	(303)
8.2 单通道数字光纤通信系统结构和设计	(306)
8.2.1 系统结构	(306)
8.2.2 光纤通信系统设计的总体考虑	(309)
8.2.3 单通道系统中继距离设计	(310)
8.3 多通道数字光纤通信系统设计	(312)
8.3.1 系统设计中应注意的问题	(312)
8.3.2 WDM+EDFA 系统中继距离设计	(314)
阅读资料:光纤通信施工方案(某学院光纤网工程施工方案)	(317)
习题.....	(319)
光纤测量	(321)
9.1 衰减测量	(321)
9.1.1 概述	(321)
9.1.2 截断技术	(322)
9.1.3 插入损耗法	(323)
9.1.4 背向散射法	(323)
9.2 色散测量	(324)
9.2.1 概述	(324)
9.2.2 模间色散	(324)

9.2.3 时域模间色散测量	(325)
9.2.4 频域模间色散测量	(326)
9.2.5 色度色散	(326)
9.2.6 偏振模色散	(327)
9.3 OTDR 的应用	(328)
9.3.1 衰减测量	(328)
9.3.2 光纤故障位置判定	(329)
9.4 眼图分析	(330)
9.5 光谱分析仪的应用	(332)
9.5.1 光源的性能评价	(332)
9.5.2 EDFA 增益和噪声图测试	(333)
阅读资料:OTDR	(334)
习题.....	(336)
参考文献	(337)

概 论

什么是信息?“蓝色的天空,飘着白云”,“今天航班取消了”,“春天来了,我看到杨树、柳树绿叶了”,等等,都是信息。“前方的道路不通,请右行”,这既是信息,又是一种单向的通信。

什么是通信?人们的日常生活离不开信息交换,语言交流、眼神、表情等都是通信(communiation),通信的本质就是信息的交流。本章主要介绍光纤通信的一些基本概念,然后回顾光纤通信(optical fiber communication)的历程,并对现代光纤通信技术做了总结。

1.1 光纤通信的概念

1.1.1 光纤通信

自古以来,人类的交流就是依靠各类信息的沟通,通信(communiation)就是人们的最基本需求之一,这种需求不断地促使人们开始发明能将信息从一个地方迅捷、有效地传送到另一个遥远地方的通信技术。从广义的角度来说,通信就是彼此之间传递信息。

进一步讲,古时候,人们在土石、树木上做上记号,“记号”可能是一种文字,或者是一种表示什么意义的图形,但“记号”是一种信息。这样处理信息的作用有两个意义,一是保存(信息的存储),二是传递给后人。

现代的通信一般是指电信(telecommunication)。IEEE(美国电气和电子工程师学会)对电信的定义是:借助诸如电话系统、无线电系统、网络系统、电视系统这样的设备,在相隔一定距离的条件下进行的信息交换。在漫长的现代通信的科学发展道路中,通信经历了电通信(electrical communication)和光通信(optical communication)两个阶段。广义的电通信指的是一切运用电波作为载体而传送信息的所有通信方式的总称,而不管传输所使用的介质是什么。电通信又可分为有线电通信和无线电通信。类似于电通信,广义的光通信指的是一切运用光波作为载体传送信息的所有通信方式的总称,而不管传输所使用的介质是什么(当然也包括无介质光通信,光在真空中传播,也能进行光通信,就是无介质光通信)。光通信也可以分为利用大气进行通信的无线光通信和利用石英光纤或塑料光纤进行通信的有线光通信。人们通常把应用石英光纤的有线光通信简称为光纤通信(optical fiber communication)。

1970年被多数国家称为光纤通信元年。经过近40年的迅猛发展,光纤通信已经逐步从点对点通信向多点对多点的全光高速密集波分复用系统网络推进。从宏观来看,光纤通信主要包括光纤光缆、光电子器件及光纤通信系统设备等三个部分。光电子器件包括有源器件和无源器件。有源器件包括光源(发光二极管、半导体激光器)、光电检测器(光电二极管、雪崩光电二极管)和光放大器(掺稀土光纤放大器、半导体激光放大器、光纤拉曼放

大器等)以及由这些器件组成的各种模块等。无源器件包括光连接器、光耦合器、光衰减器、光隔离器、光开关和波分复用器等。同时,还有光电集成(OEIC)和光子集成(PIC)器件。

随着电子材料科学的发展,光纤通信的器件将会有更多更理想的器件研制出来。

1.1.2 光纤通信系统

光纤通信系统是指信号产生到信号的还原的全过程。图 1.1 是典型的点对点光纤通信链路示意图。其关键部分是:由光源和驱动电路组成的光发射机;将光纤包在其中以对光纤起到机械加固和保护作用的光缆;由光检测器和放大电路、信号恢复电路组成的光接收机。一些附加的元件包括光放大器、连接器、接头盒、耦合器和再生中继器(用于恢复信号形状的特性)等。

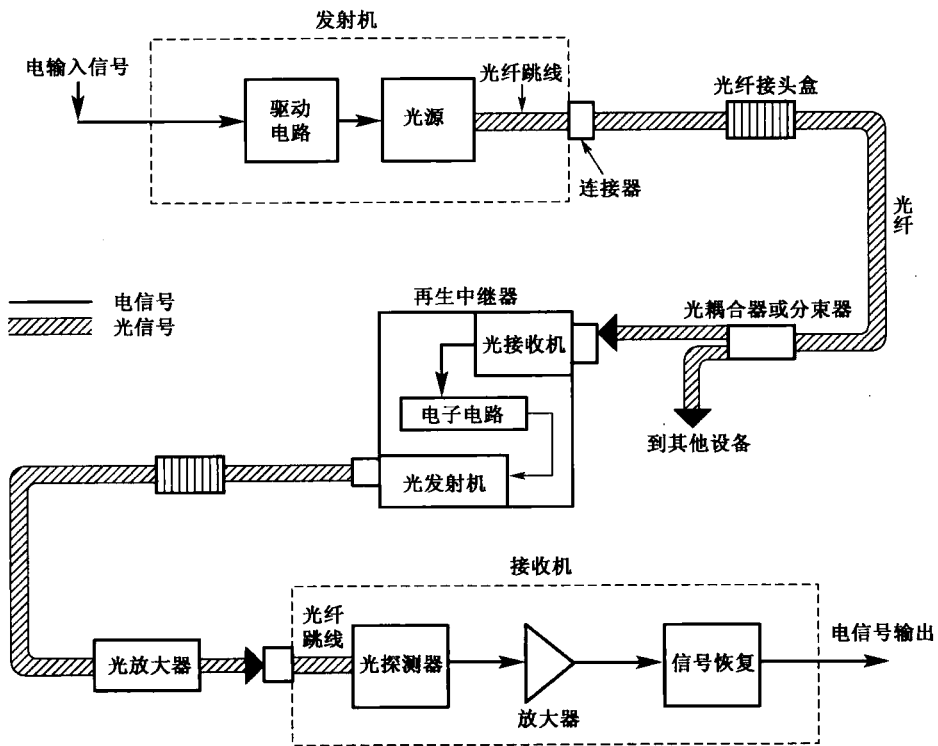


图 1.1 点对点光纤通信链路示意

从图 1.1 可以看出,光纤通信系统存在光—电、电—光的转换,即电子“瓶颈”问题,因而无法满足人们超高速、超宽带及动态通信要求。自从掺饵光纤放大器商用后,波分复用(WDM)系统颇受人们的青睐,构建基于 WDM 的全光通信网络是目前的发展趋势。图 1.2 是目前一个完整的 WDM 系统。其通常包含光收发器、光耦合器、光复用/解复用器、光纤放大器、光上/下分路器、光交叉连接器、光色散补偿装置、光偏振控制装置、光开关、光波长转换器以及其他光通信器件、处理电路模块等,这些问题将在以后逐步讨论。

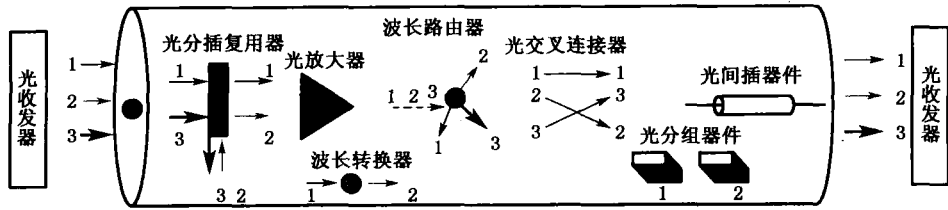


图 1.2 WDM 系统器件

1.2 光纤通信的发展历史

光纤通信的发展,可以追溯到 3 000 年前的烽火台。在这方面,人类的祖先是应用光通信的先驱。尽管古希腊也曾用过烽火台,但比中国晚了 200 年。后来出现的灯语、旗语和望远镜等都可以看做是原始形式的光通信。这种传递信息的方法极为简单且信息量有限。

我国光通信可以说始于公元前 9 世纪。长城修筑的历史可上溯到公元前 9 世纪的西周时期,万里长城上的烽火台就是光通信的例子,据考证:“前线观察哨,燃烧 1 处烟火,表示 1 级战斗准备,燃烧 2 处烟火,表示 2 级战斗准备,燃烧 3 处烟火,表示 3 级战斗准备,3 级表示有大战急战”。

但严格来说,它们都不能算作真正的光通信。

直到 1880 年,贝尔发明光电话,才可以算是控光通信的雏形。然而贝尔的“光电话”始终没有走上实用化阶段。

究其原因有二:一是没有可靠的、高强度的光源;二是没有稳定的、低损耗的传输介质,无法得到高质量的光通信。自此之后的几十年内,由于无法突破上述两个障碍,加之当时电通信的高速发展,光通信的研究曾一度沉寂。解决光通信的出路在于找到合适的光源及理想的传光介质。这种情况一直延续到 20 世纪 60 年代。

由于当时没有理想的光源和传输介质,这种光电话的传输距离很短,并没有实际应用价值,因而进展很慢。然而,光电话仍是一项伟大的发明,奠定了光通信的基础,它证明了用光波作为载波传送信息的可行性。因此,可以说贝尔光电话是现代光通信的雏形,是光通信的基础。

1.2.1 光纤通信的里程碑

20 世纪 60 年代初期,光纤通信发展史上迎来了第一个里程碑。

1960 年,世界上第一台相干振荡光源——红宝石激光器问世。美国人梅曼(Maiman)发明了第一台红宝石激光器,给光通信带来了新的希望,与普通光相比,激光具有波谱宽度窄、方向性极好、亮度极高以及频率和相位较一致的良好特性。激光是一种高度相干光,它的特性与无线电波相似,是一种理想的光载波。继红宝石激光器之后,氦-氖(He-Ne)激光器、二氧化碳(CO₂)激光器先后出现,并投入实际应用。激光器的发明和应用,使沉睡了 80 年的光通信进入一个崭新的阶段。我国光通信技术几乎是与世界同步发展的。1961 年 9

月,中国科学院长春光学精密机械研究所也研制成功我国第一台红宝石(ruby)激光器(laser—light amplification by stimulated emission of radiation)红宝石激光器可产生频谱纯度很高的光波,它的出现激起了世界性的光研究热潮,给沉寂已久的光通信研究注入了活力。1962年,PN结砷化镓(GaAs)半导体激光器出现,尽管其还不能工作在室温下,但它还是给光通信的实用化光源带来了希望。

在这个时期,美国麻省理工学院利用 He-Ne 激光器和 CO₂ 激光器进行了大气激光通信试验。实验证明:用承载信息的光波,通过大气的传播,实现点对点的通信是可行的,但是通信能力和质量受气候影响十分严重。由于雨、雾、雪和大气灰尘的吸收和散射,光波能量衰减很大。例如,雨能造成 30 dB/km 的衰减,浓雾衰减高达 120 dB/km。另一方面,大气的密度和温度不均匀,造成折射率的变化,使光束位置发生偏移。因而通信的距离和稳定性都受到极大的限制,不能实现“全天候”通信。虽然,固体激光器(例如掺钕钇铝石榴石(Nd:YAG)激光器)的发明大大提高了发射光功率,延长了传输距离,使大气激光通信可以在江河两岸、海岛之间和某些特定场合使用,但是大气激光通信的稳定性和可靠性仍然没有解决。

为了克服气候对激光通信的影响,人们自然想到把激光束限制在特定的空间内传输,因而提出了透镜波导和反射镜波导的光波传输系统。透镜波导是在金属管内每隔一定距离安装一个透镜,每个透镜把经传输的光束会聚到下一个透镜而实现的。反射镜波导和透镜波导相似,是用与光束传输方向成 45°角的两个平行反射镜代替透镜而构成的。这两种波导,从理论上讲是可行的,但在实际应用中遇到了不可克服的困难。首先,现场施工中校准和安装十分复杂;其次,为了防止地面活动对波导的影响,必须把波导深埋或选择在人车稀少的地区使用。

由于没有找到稳定可靠和低损耗的传输介质,对光通信的研究再度走入了低潮。

随后人们开始寻找用于激光通信的途径。1965年,E. Miller 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,但因其结构太复杂且精度要求太高而不能使用。而另一方面,光导纤维的研究正在扎实进行。

早在 1951 年,人们就发明了医疗用玻璃纤维,但这种早期的光导纤维损耗很大,高达 1 000 dB/km,也不能用做光纤通信的传输介质。1966 年,英国标准电信研究所的华裔科学家 C. K. Kao 博士和 G. A. Hockham,对光纤传输的前景发表了具有重大历史意义的论文“光频率的介质纤维表面波导”。论文分析了玻璃纤维损耗大的主要原因,大胆地预言,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 1 000 dB/km 降低到 20 dB/km 甚至更小,从而有可能用于通信。这篇论文鼓舞了许多科学工作者为实现低损耗的光纤而努力。1970 年,美国康宁玻璃公司的 Kapron 博士等三人,经过多次试验,终于研制出传输损耗仅为 20 dB/km 的光纤。这是光纤通信发展历史上的又一个里程碑。几乎在同时,室温下连续工作的双异质结 GaAs 半导体激光器研究成功。小型光源和低损耗光纤的同时问世,在全世界范围内掀起了发展光纤通信的高潮。1970 年被人们定为光纤通信元年。中国的光纤通信研究开始于 1974 年。

1985 年,南安普敦大学的 Mears 等人制成了掺铒光纤放大器(EDFA)。1986 年,他们用 Ar 离子激光器做泵浦源又制造出工作波长为 1 540 nm 的 EDFA。尽管这种用 Ar 离子激光器做泵浦源的光放大器显然不可能在光纤通信中得到应用,但用掺铒光纤得到

1 550 nm 通信波长的光增益本身,却在全世界引起了广泛的兴趣,掀起了 EDFA 的研究热潮。这是因为 EDFA 的放大区域恰好与单模光纤的最低损耗区域相重合,而且其具有高增益、宽频带、低噪声、增益特性与偏振无关等许多优良特性。这是光纤通信发展史上的一个划时代的里程碑。20 世纪 90 年代初,波长 1 550 nm 的 EDFA 宣告研制成功并能实际推广应用。1994 年开始,EDFA 进入商用。中国研究 EDFA 起步较晚,是从 90 年代开始的。

1989 年 G. Meltz 等人首次利用光纤的紫外光敏效应(1978 年 K. Hill 等人首次发现光纤中的光敏特性),采用两束相互干涉的紫外光束从侧面注入光纤的方法制作出谐振波长位于通信波段的光纤光栅(fiber grating)。1993 年 K. Hill 等人提出了使用相位掩膜法制造光纤光栅,使光纤光栅能灵活地、大批量地制造成为可能,之后,光纤光栅器件逐步走向实用化。光纤光栅技术使得全光纤器件的研制和集成成为可能,从而为进入人们梦寐以求的全光信息时代带来了无限生机和希望。可以说,光纤光栅、全光纤光子器件、平面波导器件及其集成的出现是光纤通信发展史上的又一个重要里程碑。

1.2.2 光纤通信的爆炸性发展

光纤通信是现在世界上发展最快的领域之一,平均每 9 个月性能翻一番、价格降低一半,其速度已超过了计算机芯片性能每 18 个月翻一番的摩尔定律的一倍。在短短的 30 多年间已经经历了五代通信系统的使用。

1977 年,世界上第一个商用光纤通信系统在美国芝加哥的两个电话局之间开通,距离为 7 km,采用多模光纤,工作波长为 $0.85\ \mu\text{m}$,光纤损耗为 $2.5\sim 3\ \text{dB/km}$,传输速率为 $44.736\ \text{Mb/s}$,这就是通常所说的第一代光纤通信系统。

1977~1982 年的第二代光纤通信系统特征是:采用 1 310 nm 长波长多模或单模光纤,光纤损耗为 $0.55\sim 1\ \text{dB/km}$,传输速率为 $140\ \text{Mb/s}$,中继距离为 $20\sim 50\ \text{km}$,于 1982 年开始陆续投入使用,一般用于中、短距长途通信线路,也用做大城市市话局间中继线,以实现无中继传输。

1982~1988 年的第三代光纤通信系统采用 1 310 nm 长波长单模光纤,光纤损耗可以降至 $0.3\sim 0.5\ \text{dB/km}$,实用化、大规模应用是其主要特征,传输信号为准同步数字体系(PDH)的各次群路信号,中继距离为 $50\sim 100\ \text{km}$,于 1983 年以后陆续投入使用,主要用于长途干线和海底通信。

1988~1996 年的第四代光纤通信系统主要特征是:开始采用 1 550 nm 波长窗口的光纤,光纤损耗进一步降至 $0.2\ \text{dB/km}$,主要用于建设同步数字体系(SDH)同步传送网络,传输速率达 $2.5\ \text{Gb/s}$,中继距离为 $80\sim 120\ \text{km}$,并开始采用掺饵光纤放大器(EDFA)和波分复用器等新型器件。

1996 年至今属于第五代光纤通信系统,主要特征是:采用密集波分复用(DWDM)技术组建大容量传送平台,单波长信道传输速率已达 $10\ \text{Gb/s}$ 甚至更高,另外,将语音、数据和图像等各种业务和接口融合在统一平台上传送,如多业务传送平台(MSTP)等。

今后光纤通信将朝着全光传输交换的方向发展,即全光网络,网络更具智能特性。在传送容量和传送距离等性能方面随着各种光技术及其器件的发展会有更大的突破。

阳光给人类带来了温暖和光明,光纤通信给人类带来了信息交流和情感的沟通,为人类建设和谐社会带来了动力。

1.3 现代光纤通信技术

1.3.1 光纤通信技术的特点

在光纤通信系统中,作为载波的光波频率比电波频率高得多,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,光纤通信是利用光导纤维传输光信号来实现通信的,比起其他通信方式来说有其明显的优越性。

1) 传输容量大

光纤通信系统的容许频带(带宽)取决于光源的调制特性、调制方式和光纤的色散特性。石英单模光纤在 $1.31\ \mu\text{m}$ 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 $1.55\ \mu\text{m}$ 。在零色散波长窗口,单模光纤都具有几十 $\text{GHz}\cdot\text{km}$ 的带宽。另一方面,可以采用多种复用技术来增加传输容量。最简单的是空分复用,因为光纤很细,直径只有 $125\ \mu\text{m}$,一根光缆可以容纳几百根光纤, $12\times 12=144$ 根光纤的带状光缆早已实现。

这种方法使线路传输容量数十成百倍地增加。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容量最有效的方法。另一方面,减小光源谱线宽度和采用外调制方式,也是增加传输容量的有效方法。

目前,单波长光纤通信系统的传输速率一般为 $2.5\ \text{Gb/s}$ 和 $10\ \text{Gb/s}$ 。采用外调制技术,传输速率可以达到 $40\ \text{Gb/s}$ 。WDM 和光时分复用(OTDM)更是极大地增加了传输容量。WDM 最高水平为 132 个信道,传输容量为 $20\ \text{Gb/s}\times 132=2640\ \text{Gb/s}$,相当于 120 km 的距离传输了 3.3×10^8 条话路。

光纤具有极大的带宽,全波光纤(光纤的低损耗和低色散区在 $1.45\sim 1.65\ \mu\text{m}$ 波长范围)出现后,它的带宽可达 25 THz。若以其十分之一作为传输频带,则可传输约 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。

2) 传输损耗小,中继距离长

目前,单模光纤在 $1310\ \text{nm}$ 波长窗口损耗为 $0.35\ \text{dB/km}$,在 $1550\ \text{nm}$ 窗口损耗为 $0.2\ \text{dB/km}$,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的中继距离长得多。

石英光纤在 $1.31\ \mu\text{m}$ 和 $1.55\ \mu\text{m}$ 波长,传输损耗分别为 $0.50\ \text{dB/km}$ 和 $0.20\ \text{dB/km}$,甚至更低。因此,用光纤比用同轴电缆或波导管的中继距离长得多。目前,采用外调制技术,波长为 $1.55\ \mu\text{m}$ 的色散移位单模光纤通信系统,若其传输速率为 $2.5\ \text{Gb/s}$,则中继距离可达 150 km;若其传输速率为 $10\ \text{Gb/s}$,则中继距离可达 100 km。

采用光纤放大器、色散补偿光纤,中继距离还可增加。而且,传输的误码率极低(10^{-9} 甚至更小)。

传输容量大、传输误码率低、中继距离长的优点,使光纤通信系统不仅适合于长途干线网而且适合于接入网的使用,这也是降低每千米话路的系统造价的主要原因。

3) 抗干扰性好,保密性强,使用安全

通信用的光纤由电绝缘的石英材料制成,信号载体是光波,有很强的抗电磁干扰能力。

光波导结构使光波能量基本上限制在光纤纤芯中传输,在纤芯外很快地衰减,光纤光缆密封性好,若在光纤或光缆的表面涂上一层消光剂则效果更好,因而信息不易泄露和窃听,保密性好。光纤材料是石英(SiO_2)介质,具有耐高温、耐腐蚀的性能,因而可抵御恶劣的工作环境。

4) 材料资源丰富,可节约金属材料

制造通常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用 460 kg 铜,而制造 1 km 光纤,只需几十克石英即可。同时,制造光纤的石英丰富而便宜,取之不竭。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。

5) 重量轻,可挠性好,敷设方便

相同话路的光缆要比电缆轻 90%~50%,而光缆重量仅为电缆重量的 1/10~1/20,直径不到电缆的 1/5。另外,经过表面涂覆的光纤具有很好的可挠性,便于敷设,可架空、直埋或置入管道。光纤重量很轻,直径很小。即使做成光缆,在芯数相同的条件下,其重量还是比电缆轻得多,体积也小得多。

通信设备的重量和体积对许多领域特别是军事、航空和宇宙飞船等方面的应用具有特别重要的意义。在飞机上用光纤代替电缆,不仅降低了通信设备的成本,而且降低了飞机的制造成本。例如,在美国波音 747 飞机上,用光纤通信代替电缆通信,使飞机重量减轻 27 磅(约 12.247 kg),相当于飞机制造成本减少 27 万美元。

当然,光纤通信除了上述优点外,也存在一些缺点。例如,组件昂贵,光纤质地脆,机械强度低,连接比较困难,分路、耦合不方便,弯曲半径不宜太小等。这些缺点在技术上都是可以克服的,它不影响光纤通信的实用。近年来,光纤通信发展很快,它已深刻地改变了通信网的面貌,成为现代信息社会最坚实的基础,并向人们展现了无限美好的未来。

总之,光纤通信不仅在技术上具有很大的优越性,而且在经济上具有巨大的竞争能力,因此其在信息社会中将发挥越来越重要的作用。随着传输容量的增加,由于采用了新的传输媒质,使得相对造价直线下降。因此,光纤通信将会普及到人类生活的各个角落。

1.3.2 现代光纤通信技术的发展趋势

21 世纪是光子的世纪,是光网络的世纪,通信走向全光网络必然要涉及开发一系列不同于以往传统光纤通信要求的新技术、新器件。

1) 超大容量光纤通信系统

随着计算机网络及其他新的数据传输服务的迅猛发展,长距离光纤传输系统对通信容量的需求增长很快,大约每两年就翻一番,原有的光纤通信系统的传输容量已成为当前和未来信息业务发展的“瓶颈”,如何最大限度地挖掘光纤通信的潜在带宽已经成为亟待解决的问题。通常,解决的方法有空分复用(SDM)、时分复用(TDM)和波分复用(WDM)等三种技术。尤其 WDM 技术通过采用单根光纤传输多路光信道信号,从而使得光纤的传输能力成倍增加。目前,遍布全球的光缆通信网大都为实用常规光缆(G. 652 光纤),采用 WDM 技术不仅可以充分利用光纤的带宽进行超大容量的透明传输,可以平滑升级扩容组建全光网络,还可以充分利用现成的、已敷设的光缆,从而节约了光纤资源。显然,WDM 技术已成为当前光纤通信领域的研究热点和首选技术,在未来的全光网络中,WDM 技术是实现全光波