



高等院校电子科学与技术专业系列教材

光纤技术

饶云江 主 编

刘德森 主 审



科学出版社
www.sciencep.com

高等院校电子科学与技术专业系列教材

光 纤 技 术

饶云江 主编
刘德森 主审

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书对光纤技术进行了全面的科学总结和归纳。第1章回顾了光纤技术、光纤通信与光纤传感技术的发展过程和趋势;第2章介绍了光纤光缆的一些基本特性以及现在工厂中常用的一些成缆方法;第3章从几何光学和模式理论的角度阐述了光纤的传输理论;第4章在传输理论的基础上介绍了新型光纤及其基本传输特性;第5、6章分别介绍了基于光纤的常用无源和有源光纤器件的基本原理;第7章介绍了光纤传感器的类别、传感原理、复用原理以及解调原理等,此外还介绍了几种常用的光纤传感网络的原理;第8章介绍了光通信系统的基本结构和几种比较前沿的光纤通信技术。

本书可作为光通信、光电子技术、光学工程、光学、仪器科学与技术等专业的高年级本科生和研究生教材,也可供相关领域的科研人员和工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

光纤技术/饶云江主编. —北京:科学出版社, 2006

(高等院校电子科学与技术专业系列教材)

ISBN 7-03-017356-2

I. 光… II. 饶… III. 光学纤维-高等学校-教材 IV. TN25

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 056838 号

责任编辑:马长芳 杨然 / 责任校对:宋玲玲

责任印刷:张克忠 / 封面设计:陈敬

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

源海印刷有限责任公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2006年8月第一版 开本:B5(730×1000)

2006年8月第一次印刷 印张:21 1/4

印数:1—3 000 字数:398 000

定价:29.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈路通〉)

《高等院校电子科学与技术专业系列教材》编委会

主 编	姚建铨	天津大学
副主编	吕志伟	哈尔滨工业大学
	金亚秋	复旦大学
	陈治明	西安理工大学

委 员 (按姓氏音序排列)

曹全喜	西安电子科技大学
崔一平	东南大学
傅兴华	贵州大学
郭从良	中国科技大学
郭树续	吉林大学
黄卡玛	四川大学
金伟琪	北京理工大学
刘纯亮	西安交通大学
刘 旭	浙江大学
罗淑云	清华大学
马长芳	科学出版社
毛军发	上海交通大学
饶云江	重庆大学
张怀武	电子科技大学
张在宣	中国计量学院
周乐柱	北京大学
邹雪城	华中科技大学
秘 书 资丽芳	科学出版社

序 言

21 世纪,随着现代科学技术的飞速发展,人类历史即将进入一个崭新的时代——信息时代。其鲜明的时代特征是,支撑这个时代的诸如能源、交通、材料和信息等基础产业均将得到高度发展,并能充分满足社会发展和人民生活的多方面需求。作为信息科学的基础,微电子技术和光电子技术同属于教育部本科专业目录中的一级学科“电子科学与技术”。微电子技术伴随着计算机技术、数字技术、移动通信技术、多媒体技术和网络技术的出现得到了迅猛的发展,从初期的小规模集成电路 (SSI) 发展到今天的巨大规模集成电路 (GSI),成为使人类社会进入信息化时代的先导技术。20 世纪 60 年代初出现的激光和激光技术以其强大的生命力推动着光电子技术及其相关产业的发展,光电子技术集中了固体物理、波导光学、材料科学、半导体科学技术和信息科学技术的研究成就,成为具有强大应用背景的新兴交叉学科,至今光电子技术已经应用于工业、通信、信息处理、检测、医疗卫生、军事、文化教育、科学研究和社会发展等各个领域。可以预言,光电子技术将继续微电子技术之后再次推动人类科学技术的革命和进步。因此,本世纪将是微电子和光电子共同发挥越来越重要作用的时代,是电子科学与技术飞速发展的时代。

电子科学与技术对于国家经济发展、科技进步和国防建设都具有重要的战略意义。今天,面对电子科学技术的飞速发展,世界上发达国家像美国、德国、日本、英国、法国等都竞相将微电子技术和光电子技术引入国家发展计划。我国对微电子技术和光电子技术的研究也给予了高度重视。在全国电子科学技术的科研、教学、生产和使用单位的共同努力下,我国已经形成了门类齐全、水平先进、应用广泛的微电子和光电子技术的科学研究领域,并在产业化方面形成了一定规模,取得了可喜的进步,为我国科学技术、国民经济和国防建设做出了积极贡献,在国际上也争得了一席之地。但是我们应该清醒地看到,在电子科学与技术领域,我国与世界先进水平仍有不小的差距,尤其在微电子技术方面的差距更大。这既有历史、体制、技术、工艺和资金方面的原因,也有各个层次所需专业人才短缺的原因。

为了我国电子科学与技术事业的可持续发展和抢占该领域中高新技术的制高点,就必须统筹教育、科研、开发、人才、资金和市场等各种资源和要素,其中人才培养是极其重要的一环。根据教育部加强高等学校本科教育的有关精神,电子科学与技术教学指导委员会和科学出版社经过广泛而深入的调研,组织出版了

这套电子科学与技术本科专业系列教材。

本系列教材具有以下特色：

(1) 多层次。考虑到多层面的需求(普通院校、重点院校或研究型大学、应用型大学)，根据不同的层次，有针对性地编写不同的教材，同层次的教材也可能出版多种面向的教材。

(2) 延续传统、更新内容、基础精深、专业宽新。教材编写在准确诠释基本概念、基本理论的同时，注重反映该领域的最新成果和发展方向，真正使教材能够达到培养“厚基础、宽口径、会设计、可操作、能发展”人才的目的。

(3) 拓宽专业基础，加强实践教学。适当拓宽专业基础知识的范围，以增强培养人才的适应性；注重实践环节的设置，以促进學生实际动手能力的培育。

(4) 适应教学计划，考虑自学需要。教材的编写完全按照教学指导委员会最新的课程设置的课程要求的指示精神，同时给学生留有更大的选择空间，以利于学生的个性发展和创新能力的培养。

(5) 立体化。教材的编写是立体的，包括主教材、学习辅导书、教师参考书和多媒体课件等。

本系列教材的编写集中了全国高校的优势资源，突出了多层次与适应性、综合性与多样性、前沿性与先进性、理论与实践的结合。在教材的组织和出版过程中得到了相关学校教务处及学院的帮助，在此表示衷心的感谢。

根据电子科学与技术专业发展战略的要求，我们将对这套系列教材不断更新，以保持教材的先进性和适用性。热忱欢迎全国同行以及关注电子科学与技术领域教育及发展前景的广大有识之士对我们的工作提出宝贵意见和建议。



教育部“电子科学与技术”教学指导委员会主任
中国科学院院士，天津大学教授

前 言

本教材为科学出版社“高等院校电子科学与技术专业系列教材”中的一部。

目前国内已出版很多有关光纤通信的教材,从国外翻译过来的教材也不少,但是真正能全面介绍光纤技术及其在通信和传感中应用的教材非常少。光纤技术和激光技术被誉为 20 世纪光学工程领域两个最伟大的成就。随着光纤技术在非通信领域(如传感)中应用范围的不断扩大,出现了很多新的光纤、光纤器件和系统以及新的光纤技术应用方向。如何把这些新的技术进展介绍给广大学生,就显得十分必要和重要。作为一门日趋成熟的科学与技术,有必要对光纤技术进行认真的科学总结和归纳,尽量在书中体现出“系统性、科学性、前沿性”,对现有的技术、理论尽可能从简描述,突出重点,深入、详尽地讨论光纤技术并兼顾其新方向、新进展。同时,结合我们自己的研究成果和经历,介绍光纤技术今后的发展方向,给学生以很好的启发。希望本教材能对光纤技术在中国的推广和普及,以及我国光纤技术的发展起到一定的作用。

在内容安排上,本书第 1 章回顾了光纤技术、光纤通信与光纤传感技术的发展过程和趋势;第 2 章介绍了光纤光缆的一些基本特性以及现在工厂中常用的一些成缆方法;第 3 章从几何光学和模式理论的角度阐述了光纤的传输理论;在传输理论的基础上,第 4 章介绍了新型光纤和光纤的基本传输特性;第 5、6 章分别介绍了基于光纤的常用无源和有源光纤器件的基本原理;第 7 章介绍了光纤传感器的类别、传感原理、复用原理以及解调原理等,此外还介绍了几种常用的光纤传感网络的原理;第 8 章介绍了光通信系统的基本结构和几种比较前沿的光纤通信技术。

本教材的参考学时为 60~80 学时,可作为光通信、光电子技术、光学工程、光学、仪器科学与技术等专业的高年级本科生和研究生教材。

朱涛老师和周昌学、王久玲两位研究生参与了第 1、2、7、8 章的编写;冉曾令老师和谷彦菊、李建忠两位研究生参与了第 3、4 章的编写;汪平河老师和廖弦、邓宏有两位研究生参与了第 5、6 章的编写。莫秋菊、陈容睿、唐庆涛、杨晓辰等研究生也参与了本书的编写,在此一并致谢。

本书由西南大学刘德森教授审阅。刘教授是我国最早出版导波光学的作者之一。刘教授认真审阅了全部文稿,并提出了中肯的意见,使本书增色不少,在此对刘教授表示衷心的感谢。

由于作者水平有限,书中难免存在一些错误,欢迎广大读者指正。

饶云江

2006 年 4 月

目 录

前言

第1章 绪论	1
1.1 历史回顾	1
1.2 光纤技术基础	4
1.3 光纤与通信网络	6
1.4 光纤与传感技术	9
1.5 光纤技术的发展.....	13
1.6 小结.....	19
思考与练习	20
参考文献	20
第2章 光纤拉制及成缆	22
2.1 光纤的分类.....	22
2.2 光纤材料.....	23
2.3 光纤的拉制.....	26
2.4 光纤成缆技术.....	34
2.5 小结.....	49
思考与练习	50
参考文献	50
第3章 光纤传输理论	51
3.1 基本结构.....	51
3.2 光线理论.....	52
3.3 模式理论.....	59
3.4 单模光纤中的偏振现象.....	71
3.5 光在非正规光波导中的传输.....	80
3.6 小结.....	86
思考与练习	86
参考文献	86
第4章 新型光纤和光纤的基本特性	88
4.1 不同波导结构的石英光纤.....	88
4.2 其他材料光纤.....	95
4.3 光纤的传输特性	103
4.4 小结	125

思考与练习.....	126
参考文献.....	127
第5章 光无源器件	129
5.1 光纤连接器	129
5.2 光纤耦合器	132
5.3 光隔离器	138
5.4 光环行器	146
5.5 光纤光栅	151
5.6 光学滤波器	162
5.7 光开关	167
5.8 光波分复用器件	172
5.9 小结	176
思考与练习.....	176
参考文献.....	178
第6章 光有源器件	180
6.1 光调制器	180
6.2 光源	184
6.3 光探测器	201
6.4 光放大器	205
6.5 小结	220
思考与练习.....	221
参考文献.....	221
第7章 光纤传感技术	223
7.1 引言	223
7.2 光纤法珀传感器	234
7.3 光纤白光干涉传感器	251
7.4 光纤光栅传感器	258
7.5 光纤陀螺传感器	268
7.6 其他类型光纤传感器	276
7.7 小结	279
思考与练习.....	279
参考文献.....	280
第8章 光纤通信技术	281
8.1 光纤通信系统概述	281
8.2 光复用技术	286

8.3 相干光通信	304
8.4 光孤子通信技术	309
8.5 全光通信网	318
8.6 小结	324
思考与练习.....	324
参考文献.....	325

第1章 绪 论

20 世纪后几十年,以光纤通信为代表的信息技术在信息领域内掀起了一场波澜壮阔的革命,极大地推动了人类向信息社会迈进的步伐。在这场革命中,半导体激光器、光导纤维(俗称光纤)以及掺铒光纤放大器的研制成功极大地推动了光通信的实用化,它们在光通信的发展历史上具有里程碑的意义。其中以光纤作为基础的各种技术发展尤为迅速。

本书将系统地向读者展示基于光纤的各种技术。本章介绍光纤技术的发展历程以及光纤与通信和传感的关系,从而揭示光纤在这两大领域中的广泛应用;第 2~4 章介绍光纤的成缆技术、基本特性及基本传输理论;第 5、6 章介绍基于光纤的各种有源和无源器件的基本原理、结构及简单应用;第 7、8 章详细介绍光纤传感与光纤通信方面的应用技术等,希望能给读者提供一幅比较完整的光纤技术发展蓝图。

1.1 历史回顾

在很久以前,人类就开始用火(实质是利用光)来发送消息。例如,在古代以色列,人们用火来表明一个月的开始;在中世纪早期,俄罗斯士兵用点火通报敌情;我国古代在长城上修建烽火台,通过施放狼烟通报敌人入侵等。可见,人们从远古时代就以最原始的方式试图使用光在两个较远的地点间发送某种信息。因为光的可见性和易于使用,这种传送消息(通信)的方式变得非常实用,但有限的传输距离和传输信息量使得这种原始通信方式难以得到广泛的应用。

20 世纪 60 年代早期激光的发现激发了科学家和工程师对光通信的研究兴趣,但是在空气中进行若干次实验尝试后,由于空气中水分对激光的吸收以及恶劣气候的影响,激光传输距离有限,仍然不能商业应用。很显然,人们必须找寻另外一种传输光信号的媒介或管道,只有有了这种传输光的管道才能使光通信变得实用。

在未找到光传输的管道以前,科学家和工程师先是从提高信号载波的频率入手进行研究,最后发现从无线电频率到微波的转移可以数十倍地提高一个给定系统的信息运载能力,但是,在信号载波超过 100GHz 后,微波与红外区域相重叠,这时空气中的微波衰减达到相当高的程度,以至于它只能在非常短的距离间传输,很显然,这样的系统仍然不能商业应用。

随后人们开始使用一种波导结构来传输超高频(ultra high frequency, UHF)电磁波,这些波导结构是一种横截面颇似矩形、两端开口的钢制管。在 20 世纪 60

年代后期和 70 年代早期,贝尔实验室的研究人员设计并制作出了每单元拥有 238 000 个语音信道的波导装置,尽管这些新的波导设备将原先矩形的横截面重新设计成了圆形,但它们仍是那种旧式的内径为几厘米的两端开口的钢管,从价格、安装、维护等一些实用观点来看,它们仍是十分低效的,所以这种波导装置仍然不能大规模应用。

接下来,研究人员将载波频率提高到光波的频率范围,即是将通信链路的发展推向了光传输这个人类通信史上非常重大的技术发展阶段。

当将载波频率提高到光波的频率范围时,如何对光进行导向呢?首先,需要开发一种实用的导向设备,它可以用像铜线传导电流那样的方式对光进行传输,这也就意味着要发展一种灵活且易于安装与维护的导向设备。相比于钢制波导管,灵活必须是这种潜在导向设备的关键特征。于是研究人员开始考虑光纤——一种由玻璃或塑料制成的透明易弯的长纤维,并且根据斯涅耳定律(反射定律),借助于使用全内反射可以使光能在光纤内部传输。

1870 年,英国物理学家 Joan Tyndall 验证了光可以在一个弯曲的水流中传播。这就证明了全内反射现象的存在。但是,直到 1951 年,研究人员才设计出第一个光导纤维镜(fiber scope),它可以用于传输人体内部器官的图像。1953 年,在伦敦皇家科学技术学院工作的 Narinder Kapany 开发出了用不同光学玻璃作芯和包层的包层纤维,这也就诞生了今天所用光纤的结构,“光纤”这个名词就是 Kapany 给出的。但是如果光纤要成为光导设备——基本特征是要能长距离传输,这就有一个新的问题需要解决,即光衰减(随着光的传输,光的能量减小的现象)。那就是说,当光通过长距离从输入端传输到输出端时,在输出端输出的能量一定不能小于接收端探测器能探测的最小光强。

1966 年,华裔科学家高锟(Charles Kao)博士在英国发表了一篇具有里程碑意义的论文“用于光频率的绝缘纤维表面波导管”,这篇论文被认为是打开通往光纤技术大门的钥匙。高锟博士针对当时玻璃纤维传输损耗高达 1000 dB/km 的情况指出:“这样大的传输损耗不是石英玻璃光纤本身固有的基本特性,而是由于材料中带有杂质,如含有过渡金属离子产生的。材料本身的损耗是由瑞利散射决定的,它随波长的四次方而下降,其损耗是很低的。因此,有可能制造出适用于长距离通信的低损耗光纤。如果把材料中金属离子含量的质量比降低到 10^{-6} 以下,则可使光纤的传输损耗下降到 10dB/km 以下,再通过改进拉丝工艺的热处理来提高材料的均匀性,就可以把损耗降至每千米几分贝以下。”

高锟博士的工作是光纤通信领域中的一个真正的突破,因为他明确地指出,要解决的主要技术问题是突破以往普通玻璃光纤在损耗方面的局限。一旦问题清楚了,接下来的任务就是如何制造具有低衰减的光纤。1970 年,康宁公司(Corning Glass Corporation)的 Rober Maurer、Donald Keck 和 Peter Schultz 根据高锟博士的思想,采用化学气相沉积(CVD)工艺第一个制出衰减少于 20dB/km 的光纤,与

同轴电缆 $5\sim 10\text{dB/km}$ 的损耗相比,还不能说是优秀的指标,但已是通信工程师可以接受的损耗,成为世界上公认的第一根通信用光导纤维。与此同时,以半导体砷化镓为基体的新一代激光二极管、发光二极管以及光探测器等器件也有突破性进展。它们的尺寸及光点大小均同光导纤维较为配合。尤其令人惊奇的是,这种光源发射的光波波长在 $0.8\sim 0.9\mu\text{m}$,而二氧化硅材料光导纤维的第一个低损耗窗口也正好落在 $0.85\mu\text{m}$ 附近。两方面的研究都有急速进展。最初半导体激光二极管工作寿命极短,仅数小时,并且要在低温环境中工作。到 1973 年,已取得在室温 30°C 连续工作 1000h 的好结果,1977 年达到 7000h。同时光纤的损耗也大幅度下降,1976 年在 $0.85\mu\text{m}$ 窗口达到 1.6dB/km ,已经是同轴电缆所望尘莫及的,光纤通信开始了工业化生产及商业化应用的新时期。1977 年在美国芝加哥城的两个电话局间开通了世界上第一条商用光纤通信系统。自那时以后,技术又有很多新发展。首先是开发了损耗更低、色散量小的 $1.31\mu\text{m}$ 波长,该波长处光纤的损耗降到 0.5dB/km 左右。由于二氧化硅的材料色散同光纤的波导色散在 $1.31\mu\text{m}$ 处几乎抵消,该波长又称零色散波长。在半导体激光器方面,研究成功 InGaAsP/InP 材料的长波长器件同 $1.31\mu\text{m}$ 窗口相配合,从而使 $1.31\mu\text{m}$ 成为长途干线光纤通信的主角。近几年来,在 $1.55\mu\text{m}$ 波长处的研究又非常活跃。一个原因是二氧化硅材料系的光纤在 $1.55\mu\text{m}$ 处具有最低损耗,可以达到 0.2dB/km ,但可惜的是该点的色散较严重,限制应用带宽。为此,大量研究工作投入到所谓色散位移光纤,即改变普通单模的结构,使其零色散点由 $1.31\mu\text{m}$ 移到 $1.55\mu\text{m}$,以获得色散及损耗均最低的理想情况。这方面的研究以及与之配合的半导体激光器、探测器等器件均已成功。 $1.55\mu\text{m}$ 波段研究工作活跃的另一个原因是近几年掺铒光纤放大器异军突起。用稀土元素铒掺杂的光纤,在 $1.48\mu\text{m}$ 或 $0.98\mu\text{m}$ 波长的较强激光功率泵浦下,通过受激辐射可以将 $1.55\mu\text{m}$ 的信号放大,做成在线光放大器,使长途干线光纤系统的设计大为改进。目前供使用的掺杂光纤放大器工作在 $1.55\mu\text{m}$ 。

至 20 世纪 80 年代初,世界各地开通的光纤通信线路已达上千条。除用作电话通信外,也用于数据传输、闭路电视、工业控制与监测,以及军事。1988 年,第一条跨越大西洋海底,连接美国东海岸同欧洲大陆的光缆开通。1989 年 4 月,从美国西海岸经夏威夷及关岛,连接日本及菲律宾的跨太平洋海底光缆开通服务。最近又有第三条跨大西洋海底光缆要投入使用。这些都是耗资若干亿美元的浩大通信工程。在陆地上的推广应用更是日新月异。工业发达国家及我国均已宣布:干线大容量通信线路不再新建同轴电缆,而全部铺设光缆。我国光纤通信起步不晚,但由于有各种限制因素,直到 20 世纪 80 年代中期才开始在推广应用及工业基础方面取得长足进步。干线系统中比较著名的有南沿海工程、沪宁汉干线、芜湖至九江(含过长江的水下光缆)、京汉广等,短距离的系统更是不计其数。在武汉、上海、西安、北京、天津等地建立了几家规模较大、水平较高的光纤、光缆制造厂,另外还有一批与之配

套的光电子器件的工厂及研究所,为光纤通信在我国广泛应用打下了基础。到2001年底全国铺设光缆总长度已达149.5万公里,其中长途干线光缆33.5万多公里,本地中继网光缆线路75.5万多公里,接入网光缆线路37万多公里。到2002年3月,我国“八横八纵”格状国家光通信骨干网也已基本建成。近两年来,我国铺设光缆的方向已经开始转向城域网等局部性网络,随着光通信的发展,我国数据传输速度和质量将进一步得到改善和提高。

1.2 光纤技术基础

虽然透镜可以弯曲光束,反射镜可以偏转光束,但实际上光束在光学仪器之间仍然是沿直线传播的,光的直线传播特性保证了照相机、人的双眼、望远镜和显微镜等结构能正确成像。有时候,我们更希望让光线绕过物体,就可以知道物体之后或者直视观察不到的地方有什么东西,也就可以将光线从一个地方传输到另一个地方,通过这种方式光就可以用来通信、观察、照明等,这就是光纤技术研究的范畴了。下面我们先来了解一些光纤方面的基础知识,这些知识在后续的章节还会详细介绍。

1. 光纤结构

光纤的基本结构十分简单。光纤的纤芯是由折射率比周围包层略高的光学材料制作而成的,如图1.1所示。这种光纤结构引起全内反射,从而引导光线在纤芯内传播。

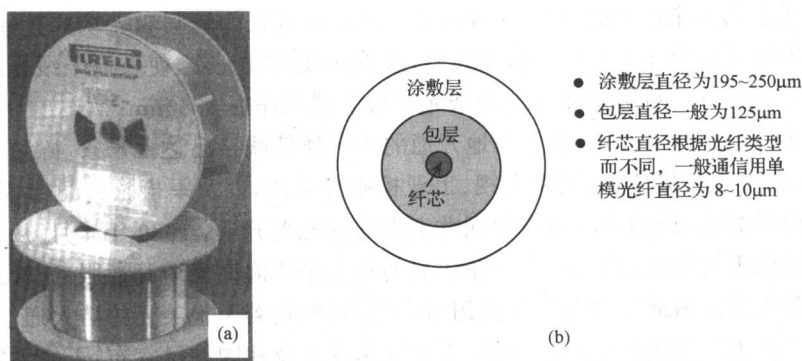


图 1.1 光纤的基本结构
(a) 整圈光纤; (b) 光纤横截面

光纤的基本结构是导光的纤芯和外面低折射率的包层,不同类型光纤的纤芯和包层的几何尺寸差别很大。用于高清晰度图像传输的光纤(传像光纤)其芯径小、

包层薄;传输高功率能量的照明光纤则一般具有更粗的纤芯和细薄的包层;用于通信的光纤则是厚包层和小纤芯,纤芯折射率到包层折射率的变化是阶跃变化,纤芯折射率可以是均匀的,也可能是渐变的;还有一些高性能光纤其纤芯和包层之间甚至有多层结构。

通信光纤的标准包层直径是 $125\mu\text{m}$,塑料护套的直径约 $250\mu\text{m}$,便于操作和保护光纤内部的玻璃表面,防止刮痕或其他机械损伤。而传像光纤束中单根光纤的直径小到只有几个微米,一些特殊用途光纤则可能有几毫米。

2. 光纤材料

多数光纤几乎是纯石英,加入少量掺杂物的目的是改变纤芯或包层的折射率。从化学的角度讲,通信用最纯的光纤材料当然是纯二氧化硅,即 SiO_2 ;医用传像光纤和照明光纤则使用低纯度玻璃制造;还有一些光纤是用塑料制造的,虽然没有玻璃光纤透明,但是更灵活易用;少数光纤使用塑料作包层材料,但一般情况下塑料都是用于机械保护的外部涂敷层。

专用光纤也有可能是用其他材料制造的。例如,对于远红外波长,氟化物比石英更透明,因此氟化物有时用于红外波段。这些光纤有时被称为玻璃光纤,因为制造光纤的材料是玻璃态或非晶态物质,但是光纤是由制造材料决定的,如氟化物玻璃光纤。

3. 光纤特性

在机械特性方面,光纤坚硬而又弯曲灵活,强度极大。细光纤比粗光纤更容易弯曲。通信光纤的尺寸可以和人的头发的粗细相比,但这种比较也得是在很粗的头发和很细的光纤之间进行。通信光纤比同样长度的人的胡须要硬得多,把它比作单丝钓鱼线很恰当。和电线不同,光纤被弯曲后还能恢复到原来笔直的形状,但光纤在受到外力牵引时不能一直延伸下去,外力过大就会折断光纤。如果光纤表面布满了裂纹,那么光纤就很容易损伤。塑料涂敷层的作用就是防止光纤表面受到机械损伤。

光纤的光学性质取决于它们的结构和成分,最明显的就是损耗或信号衰减特性,此外还有很多损害光脉冲的消极因素,这些将在第3章详细介绍。

4. 图像传输和成束光纤

光纤最初是用于图像传输的。如果光纤束的两头光纤的排列都是相同的,则光纤束可以传输图像。光纤束还可以用来传送照明光,这时光纤的排列就不重要了。

光纤束可软可硬。软光纤束由许多分离的光纤组成,两头固定中间松散(外面可能会有一层保护结构)。硬光纤束将光纤熔合成一个棒,在制造时通常弯曲成想要得到的形状。这种坚硬熔合光纤束比软光纤束的成本低,每根光纤还能做得比散

开的光纤更细,但是既不灵活也不柔软,所以很多场合不适用,比如无法用于观察病人的咽喉。

1.3 光纤与通信网络

光纤的带宽和具有吸引力的特征使其成为理想的线缆传输媒介。对于通信系统,光纤是具有强大运载信息能力的工具。它不仅为电信工业带来巨大的收益,还引发了很多革命性的变化。今天,这项技术决定了接入、传输、信令、交换和联网等技术,换句话说,它在现代电信系统中的每个方面都起着关键性的作用。因此可以说,没有低损耗光纤就没有现代电信。

很难用准确的日期来标记这项技术发展的重要转折点,因为它总是处在一个持续变化的状态。所以,对于这个不断发展的技术,昨天的新产物到了今天就变得很平常甚至落伍了。不过,通常可以确定的是,在 20 世纪 90 年代早期第一次大规模使用光纤网络(不是简单的点到点连接,而是实际的网络),所有的长途和本地电话公司都将光纤作为主要的传输介质,而电话网络依然是电信的灵魂与核心。光纤工业已进入显著的繁荣期。全世界的电信用户都想获得更大的带宽,光纤正好能够满足人们的愿望。在过去的 20 年里,一根光纤所能承载的最大数据率差不多平均每年翻一番,比电子行业的摩尔定律(每 18 个月翻一番)还要快。

1. 全球海底网络

第一条国际海底光纤链路连接了英格兰和比利时,它于 1986 年在北海海底铺设。到 1988 年年底为止,铺设了第一条连接美国和欧洲的跨大西洋海底光缆。那个项目被称为 TAT-8,它是 AT&T、英国电信、法国电信和其他公司共同投资进行的。这个链路先是从新泽西州的 Tuckerton 连到欧洲的大陆架,长度为 5600km,在那里链路分成两个分支,一支经过五百多千米连到英国,另一支经过三百多千米连到法国。这个链路可以运载 80 000 个语音信道。不过这个数字只表明它的运载信息能力,因为显然它不仅传输语音,还传输视频和数据。这条链路使用单模光纤,使用的波长是 1300nm。它的光源采用的是平均寿命可达 106h 的激光二极管。为了对付信号衰减,沿着电缆每隔 50km 安装一个再生中继器。从功能上讲,它是处理数字信号的,它分析到来的信号,判断信号是代表逻辑 0 还是 1,根据判断结果产生新的脉冲,然后将这些脉冲沿着链路继续向前发送。这样,再生中继器不停地重复到来信号的逻辑含义,并产生新的电信号来传输这些逻辑含义。为了完成这个任务,再生中继器先要将光信号转化成电的形式,对电信号进行处理,然后再把电信号转换为光信号在光纤上继续传输。

光纤是个绝缘体,它不能够直接传输电信号和能量。所以一个用来传输电能的单独导线必须包括在海底电缆中。TAT-8 项目中的导线要传输 1.6A 的电流来为

系统的中继器提供电能,这是光纤在长距离传输方面的一个缺点。

前几年在连接美国和欧洲的项目(1996)TAT-12 和 TAT-13 中使用最新的波分复用(wavelength-division multiplexing)技术来进一步提高链路的运载信息能力。这些链路可以运载超过 300 000 个语音信道,几乎是 TAT-8 跨越大西洋链路所能运载的 80 000 个语音信道的四倍多。

现在,整个世界已经用一个庞大的光网络连接在一起。一个发展全球网络最好的例子是称作泛美电缆系统(Pan American Cable System)的国际项目,该网络通过国际网关把南美洲的 7 个国家和北美洲、欧洲、亚洲连接起来。其中加勒比海海底部分把位于美国维京岛的圣托马斯的起点与委内瑞拉、阿鲁巴岛、哥伦比亚和巴拿马相连。这段海底电缆有 2700km,共安装 23 个再生中继器,每 120km 一个。太平洋海底部分将巴拿马与厄瓜多尔、秘鲁和智利相连。这一部分长 4400km,共有 40 个再生中继器,每 150km 一个。链路的总长度有 7300km,其中 200km 的电缆在巴拿马陆上铺设。

还有其他几个全球海底项目正在进行之中:Pro. lect Oxygen(氧气计划)以建立一个全球的海底光纤网络为目标;全球交叉公司(Global Crossing Ltd,GCL)正在建立一个海底和陆地的全球光纤通信网络。除前面描述过的泛美电缆系统外,泛美交叉电信电缆系统(Pan American Crossing Telecommunications Cable System,PAC)也正在连接加利福尼亚、墨西哥、巴拿马和美国维京岛的圣克罗伊,并在那里与 GCL 的大西洋海底网络相连。

随着几年前(2002 年左右)光通信市场泡沫的破灭,全球海底光通信市场迅速跌入谷底。据 TeleGeography 公司统计,全球海底光缆系统的投资额 2001 年曾高达 130 亿美元,但 2002 年一下子跌到 34 亿美元,2003 年预计将只有 12 亿美元。但是,从长远观点看,海底光通信市场还将有一定增长空间。随着通信量的不断增长,当前容量大于需求的状况终将结束,海底光缆系统将再次进入发展期,跨太平洋/亚太海底光通信尤其如此。据美国 Pioneer Consulting 公司的最新预测,从 2002 年到 2012 年,跨太平洋海底光缆的容量将每年增长 42%,2012 年可达到 16Tbit/s;而亚太地区海底光缆容量在同一段时间的复合年增长率为 46%,2012 年将达到 21Tbit/s。目前跨太平洋和亚太地区海底光缆系统的容量利用率分别为 60%和 58%;但 Pioneer Consulting 公司认为,同今后的容量不足比起来,现在的容量过剩并不严重。在出现实际的容量不足之前,将会建一些新的系统,而建设新的海底光缆系统的机会将首先出现在跨太平洋的路由上。

2. 陆地网络

显然全球光纤网络不仅包括海底段也包括陆地部分。不仅整个美国陆地已经布满庞大的光纤网络,所有其他的国家都在经历着同样的过程。另一个典型的例子是泛欧光纤网络。这个项目的目的是使用波分复用技术,用光纤网络覆盖包括东欧