



普通高等教育**电子通信类**国家级特色专业系列规划教材

光纤通信系统及网络

孙 强 周 虚 编著



科学出版社

普通高等教育电子通信类国家级特色专业系列规划教材

光纤通信系统及网络

孙 强 周 虚 编著

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书从光纤通信技术及应用的角度,系统地阐述了光纤通信的基本原理和光网络及其主要技术,内容包括光纤和光缆、激光器与探测器、数字光纤通信系统、模拟光纤通信系统、光互联网络技术、以太网无源光网络、光网络器件等。本书在内容取材上强调系统性、先进性,注重物理概念的阐述,理论联系实际,深入浅出,实用性强。

本书可作为高等院校通信类专业本科生、研究生教材,也可供从事光纤通信技术的科研人员与工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

光纤通信系统及网络/孙强,周虚编著. —北京:科学出版社,2011

(普通高等教育电子通信类国家级特色专业系列规划教材)

ISBN 978-7-03-031922-7

I. ①光… II. ①孙…②周… III. ①光导纤维通信系统-高等学校-教材②光纤网-高等学校-教材 IV. ①TN929.11

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第150076号

丛书策划:匡 敏 潘斯斯

责任编辑:潘斯斯 卜 新 / 责任校对:林青梅

责任印制:张克忠 / 封面设计:迷底书装

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>

新蕾印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2011年7月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2011年7月第一次印刷 印张:15 1/4

印数:1—3 500 字数:380 000

定价:30.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

由于光纤和激光器在 1970 年的重大突破, 光纤通信有了实现的可能。40 多年以来, 光纤通信在构成社会信息基础设施方面扮演着重要角色。光纤通信的出现与迅速发展大大改变了信息技术的面貌。该技术很快在世界上得到了广泛的应用, 不仅在陆地上使用, 而且还应用到了海底通信, 它成为国民经济各个领域(如通信、广播、电力、交通、军事等)的主要通信手段。可以毫不夸张地说, 光纤通信已经成为现代通信的支柱、世界通信网的骨干。虽然一般来讲光纤技术已经成熟, 但其发展势头方兴未艾, 各种新技术、新产品、新构思、新应用如雨后春笋般地涌现, 推动着光纤通信技术的进一步发展。掺铒光纤放大器、密集波分复用技术、光分插复用技术、光交叉连接技术、波长转换技术、光交换技术、相干光通信技术、光孤子通信技术和光网络技术等新技术得到了广泛的应用和深入的研究。

本书是在北京交通大学电子信息工程学院开设的光纤通信课程讲稿的基础上, 结合光纤通信原理及最新技术应用的发展编写而成的。在编写中, 我们力求将基本原理和实际应用有机地结合起来, 尽量把最新的技术介绍给读者。

全书所包含的内容主要有光纤和光缆、激光器与探测器、数字光纤通信系统、模拟光纤通信系统、光互联网络技术、以太网无源光网络和光网络器件等。

本书第 1 章介绍了光纤通信的基本概念, 包括光纤通信使用的频段、光纤通信的优点、光纤通信系统的基本结构、光纤通信系统的应用、现代光纤通信技术角色等。第 2 章介绍了光纤光缆的基础知识, 包括光纤的基本传输理论、光纤的基本特性、光纤的结构和类型、光纤的最新发展、新型光缆结构等。第 3 章介绍了激光器与探测器, 包括激光原理的基础知识、半导体光源、光电探测器等。第 4 章主要介绍了数字光纤通信系统的原理及典型应用, 包括数字光发射机、线路编码、数字光接收机、两种传输体制、光纤通信系统设计等。第 5 章主要介绍了模拟光纤通信系统的基本原理及典型应用, 包括调制方式、模拟基带直接光强调制光纤传输系统、多频道视频信号光纤传输系统、光缆 CATV 网的设计等。第 6 章主要介绍了光互联网络, 包括波分复用系统、光纤放大器、光互联网络技术等。第 7 章主要介绍了以太网无源光网络, 包括体系结构、工作原理、改造方案、关键技术等。第 8 章主要介绍了光网络器件, 包括光网络器件的基本性能、光连接器、光衰减器、光隔离器、光环形器、光耦合器、波分复用器和解复用器、光分插复用器、光开关、光交叉连接器、光波长变换器等。

本书从光纤通信系统及网络角度, 比较系统地阐述了光纤通信的基本原理和以太网无源光网络, 注重物理概念和理论的阐述, 力求新颖性和实用性。书中尽可能地收集国内外的有关成果, 对光纤通信领域中的高新技术做了系统而较完整的介绍, 使读者对光纤通信的发展方向有一个全面的了解。

本书由孙强主编并由他编写了第 3、4、5、7 章, 周虚编写了第 1、2、6、8 章。亢嘉豪、尚雁秋等同学在本书的编写过程中, 给予了很大的帮助, 在此向他们表示真挚的谢意。

由于时间仓促, 作者水平有限, 书中必定会存在错误和不足之处, 望读者批评指正。

作 者
2011 年 5 月

目 录

前言

第 1 章 概述	1
1.1 光纤通信简介	1
1.2 光纤通信使用的频段	2
1.3 光纤通信的优点	3
1.4 光纤通信系统的基本结构	4
1.5 光纤通信系统的应用	5
1.6 现代光纤通信技术角色	6
习题.....	7
第 2 章 光纤和光缆	8
2.1 光纤的优点	8
2.2 光纤的基本传输理论	9
2.3 光纤的基本特性.....	16
2.4 光纤的结构和类型.....	23
2.5 光纤的制造.....	24
2.6 光纤的最新发展.....	28
2.7 光缆的结构和类型.....	31
2.8 新型光缆结构介绍.....	33
习题	36
第 3 章 激光器与探测器	37
3.1 激光原理的基础知识.....	37
3.2 半导体光源.....	45
3.3 光电探测器.....	55
习题	62
第 4 章 数字光纤通信系统	63
4.1 数字光发射机.....	63
4.2 线路编码.....	65
4.3 数字光接收机.....	75
4.4 两种传输体制.....	80
4.5 备用系统与辅助系统.....	89
4.6 系统的性能指标.....	91
4.7 光纤通信系统设计概述.....	97
习题.....	102
第 5 章 模拟光纤通信系统	104
5.1 调制方式	104

5.2	模拟基带直接光强调制光纤传输系统	108
5.3	多频道视频信号光纤传输系统	115
5.4	光缆 CATV 网的设计	120
	习题	125
第 6 章	光互联网络技术	127
6.1	波分复用系统	127
6.2	光纤放大器	139
6.3	光互联网络技术	145
	习题	168
第 7 章	以太网无源光网络	169
7.1	基本概述	169
7.2	体系结构	174
7.3	工作原理	178
7.4	基于 EPON 的某市广电网络改造方案	181
7.5	EPON 系统中的关键技术	194
	习题	198
第 8 章	光网络器件	199
8.1	作用	199
8.2	基本性能	199
8.3	光连接器	201
8.4	光衰减器	208
8.5	光隔离器	211
8.6	光环形器	213
8.7	光耦合器	215
8.8	波分复用器和解复用器	218
8.9	光分插复用器	221
8.10	光开关	223
8.11	光交叉连接器	227
8.12	光波长变换器	229
	习题	232
	参考文献	234
附录 A	光缆的型号与命名法	235
附录 B	有线电视频道设置	238

第1章 概 述

光纤通信已成为现代通信的主要支柱之一，在现代通信网中起着举足轻重的作用。本章介绍光纤通信的基本概念、光纤通信使用的频段、光纤通信的优点以及光纤通信系统的构成。

1.1 光纤通信简介

光纤通信是指在光纤中传输光信号以实现通信的目的。本节介绍光纤通信的概念和发展。

1.1.1 光纤通信的概念

光纤通信是利用半导体激光器（Laser Diode, LD）或半导体发光二极管（LED）作为光源器件，把电信号转换成光信号并将其耦合进石英（或塑料）光纤中进行传输；在接收端使用半导体检测器件（检波器），如雪崩光电二极管（APD）或光电二极管（PIN）等，将光信号再还原为电信号的一种通信方式。

光纤通信技术是20世纪70年代初期兴起的一门高新技术。光纤通信一经问世就异军突起，以其技术上的先进性和巨大的经济效益，对传统的通信手段提出了强劲的挑战，显示了极强的生命力。现在，光纤通信的应用范围，除公用通信网外，在铁路通信、电力通信、军用通信、有线电视、数据通信系统等方面都得到了极其广泛的应用，许多新的应用领域还在不断开拓之中。

实现光纤通信的关键器件与技术如下。

- （1）低损耗、宽带宽的光纤。
- （2）高可靠性、长寿命的光源及高响应的光检测器件。
- （3）光测量以及光纤连接技术。

1.1.2 光纤通信的发展概况

人类很早就认识到用光可以传递信息，2000多年前我国就有了用光远距离传递信息的设施——烽火台，后来有了用灯光闪烁、旗语等传递信息的方法。以发明电话而闻名的发明家贝尔也在光通信方面作出过贡献，1880年，他利用太阳作光源，用硒晶体作为光接收器件，成功地进行了光电话的实验，通话距离最远达到了213 m。由于大气作为传输介质时损耗很大，而且无法避免自然气象条件的影响和各种外界的干扰，最多只能传几百米远的距离，因此人们不得不寻求可以在封闭状态下传送光信号的办法，例如用波导管、棱镜、透镜折射的光束导管等。不过这些波导结构复杂，难以实现实用导光的目的。

玻璃纤维也是一种能把光信号封闭在其中的光波导，但是它的衰减损耗很大，只能传送很短的距离。20世纪60年代，最好的玻璃纤维的衰减损耗仍在1 000 dB/km以上。这是什么概念呢？10 dB/km损耗表示输入的信号传送1 km后只剩10%，20 dB/km损耗表示信号传送1 km后只剩1%，30 dB/km表示信号传送1 km只剩0.1%……1 000 dB/km表示信号传送1 km后只剩下亿万分之一，这是无论如何也不可能用于通信的。因此，当时有很多科学家和发

明家认为用玻璃纤维通信希望渺茫，失去了信心，放弃了光纤通信的研究。就在这种情况下，1966年7月，英国标准电信研究所的英籍华人高锟（K. C. Kao）博士和霍克哈姆（G. A. Hockham）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大的主要原因，同时大胆地预言，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，从而有可能用于通信。这篇论文鼓舞了许多科学家为实现低损耗的光纤而努力。1970年，美国康宁（Corning）玻璃公司的卡普隆（Kapron）博士等3人，经过多次的试验，终于研制出传输损耗仅为20 dB/km的光纤。这样低损耗的光纤在当时是惊人的成功，使人们看到了光纤通信的希望。

光纤通信的另一项重要技术是光纤通信用的光源，因为传送光信号不能用普通的光。太阳光、灯光的频率和相位是杂乱的，不能用于大容量的通信。1960年美国人梅曼（T. H. Maiman）发明了红宝石激光器，从而使人们获得了性质与电磁波相同、而且频率和相位都稳定的光——激光，这才使人们进入了近代光通信的时代，但是红宝石激光器还不能在室温条件下连续工作。又经过多年的研究试制，1970年贝尔研究所的林严雄等人（I. Hayoshi, et al）研制出能在室温下连续工作的半导体激光器，这种激光器只有米粒大小。尽管最初的激光器的寿命很短，但这种激光器已被认为可以作为光纤通信的光源。由于光纤和激光器在1970年的重大突破，使光纤通信有了实现的可能，因此1970年被认为是值得纪念的光纤传输元年。

1970年这两项关键技术的重大突破，使光纤通信开始从理想变成可能，立即引起了各国通信科技人员的重视，竞相进行研究和实验。1974年美国贝尔研究所发明了低损耗光纤制法（MCVD法，即改良化学气相沉积法），使光纤损耗降低到1 dB/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h（实用中10年左右）的半导体激光器，从而有了真正实用的激光器。1977年，世界上第一条光纤通信系统在美国芝加哥市投入商用，速率为45 Mbit/s。

进入实用阶段以后，光纤通信的应用发展极为迅速，应用的光纤通信系统已经多次更新换代。70年代的光纤通信系统主要是采用多模光纤，应用光纤的短波长（850 nm）波段。80年代以后逐渐改用长波长（1 310 nm）波段，光纤逐渐采用单模光纤。到90年代初，通信容量扩大了50倍，达到2.5 Gbit/s。进入90年代，传输波长从1 310 nm转向更长的1 550 nm，并且开始使用光纤放大器、波分复用（WDM）等新技术。通信容量和中继距离继续成倍增长，广泛地应用于市内电话中继和长途通信干线，成为通信线路的骨干。

我国从1974年开始光纤通信的研究，到80年代末，光纤通信的关键技术已达到国际先进水平。从1991年起，我国已不再建设长途电缆通信系统，转向大力发展光纤通信。在“八五”期间，建成了含22条光缆干线、总长达33 000 km的“八横八纵”大容量光纤通信干线传输网。1999年1月，我国第一条最高传输速率的国家一级干线（济南—青岛）8×2.5 Gbit/s密集波分复用（DWDM）系统建成，使光纤的通信容量又扩大了8倍。

1.2 光纤通信使用的频段

光波也是一种电磁波，其波长在 μm 级，频率为 10^{14} Hz数量级。由图1-1电磁波谱中可以看出，紫外线、可见光、红外线均属于光波的范畴。目前光纤通信使用的光源的波长范围是在近红外区内，即0.8~1.8 μm 。它可以分为短波长波段和长波长波段。短波段光波的波长为

0.85 μm , 长波段光波的波长为 1.31 μm 和 1.55 μm , 这是目前采用的三个通信窗口。

1.3 光纤通信的优点

光纤通信之所以发展迅猛, 这与光纤通信技术所具有的巨大技术优势和潜力以及巨大的经济效益和社会效益是分不开的。

光纤通信最直接、最基本的优点可以从经济和技术两个方面看。

1. 经济优势

(1) 频率资源丰富, 通信容量极大。多模光纤的带宽最高可达 7 GHz, 远大于同轴电缆。单模光纤的可用带宽高达 200 THz。一对单模光纤的潜在容量达到上亿路电话, 几乎是用之不尽。光纤通信的容量主要受到端机速率的限制。现在世界上最高速率的商用系统为 40 Gbit/s。

(2) 无中继通信距离长。以 140 Mbit/s (1920 路) 1.3 μm 单模光纤通信系统为例, 在光纤损耗为 0.4 dB/km 时, 其中继距离可达 60 km。而 300 路、960 路、1 800 路同轴电缆通信系统, 中继距离只有 4~8 km。微波系统中继距离为 50 km。若采用 1.55 μm 波长光纤传输系统时, 中继距离可超过 100 km。

由于中继距离长, 在长途干线通信中, 中继器的数量相应减少, 这就大大降低了成本, 提高了可靠性, 也减少了日常维护的工作量及维护费用。

在市内局间通信中可以做到局间无中继传输。根据对我国目前城市的抽样调查, 市话局间中继线长度小于 15 km 的占 92.9%, 显然若采用光纤通信系统, 这就大大地减少了中继器的数量, 降低了通信的成本。

(3) 节约铜 (铝) 和铅。我国乃至世界铜资源都非常缺乏。1 km 长的八管中同轴电缆要耗铜 1.2 t。利用石英玻璃纤维代替同轴电缆实现通信, 可以节约大量的铜 (铝) 和铅。

(4) 抗干扰能力强、保密性能好。光纤不受电磁干扰, 具有抗电磁辐射的能力, 保密性能好。光缆直接埋在电气化铁道的路基上, 或与高压线同杆架设, 甚至直接制作在 OPGW 中, 都不会受到干扰, 也不用担心电网故障时地电位升高而带来的一系列问题, 因此在电力部门、铁路部门、军事部门得到广泛应用。

(5) 光缆耐腐蚀、重量轻、体积小。这是由于光纤的制作材料主要是 SiO_2 的缘故。

2. 技术优势

除了上述的基本优势外, 光纤传输系统与传统的传输方式相比, 在技术上还有许多优势。

(1) 数字光纤传输系统很容易与程控交换机相连接, 而主要用于模拟通信的同轴电缆很难满足数字化的要求。

(2) 数字光纤传输设备采用了专用超大规模数字集成电路和混合集成电路以及表面安装技术, 使设备的可靠性大大提高。

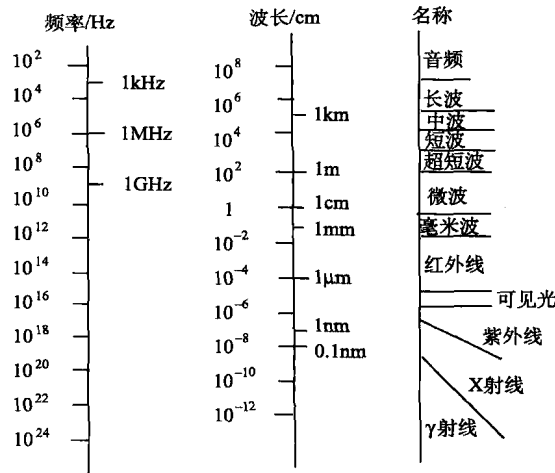


图 1-1 电磁波谱

(3) 由于数字光纤传输系统采用 PCM 技术，因而可以方便地利用终端设备上的计算机实现全系统的监测与监控。

(4) 扩容方便。扩容时只要增加若干光、电设备，不必更换光缆，不必增加中继站数量。

(5) 利用“插入比特”的线路码型，可以方便地解决“区间通信”问题和任意上下话路问题。

(6) 光纤/同轴电缆混合 (Hybrid Fiber Coax, HFC) 技术广泛的应用于有线电视网中。

(7) 波分复用 (Wavelength Division Multiplex, WDM) 技术使得光纤通信的容量大幅度提高而不用增加光纤芯数。

由于现代社会的需要，数字设备将逐步取代模拟设备，而建立综合业务数字网已成为当代世界通信发展的趋势。由于光纤通信恰好最能适合实现大容量、长距离的宽带业务和数字信号的传输。因此，我们可以讲光纤通信技术上的巨大优势和潜力，打开了本世纪的全新通信之门。

1.4 光纤通信系统的基本结构

目前使用的光纤通信系统，普遍采用的是强度调制-直接检波通信系统。强度在这里指光强，是指单位面积上的光功率，所谓强度调制，是用信号电流去直接调制光源的光强，使之随信号电流成线性变化；直接检波是指信号直接在接收机的光频上检测为电信号。

光纤通信系统可以分成两大类：数字光纤通信系统和模拟光纤通信系统。

数字光纤通信系统的示意方框图如图 1-2 所示。

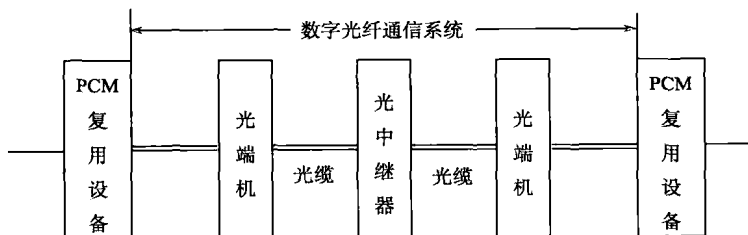


图 1-2 数字光纤通信系统的基本构成

图 1-2 中 PCM 复用设备是电端机，电端机包括发送电端机和接收电端机。发送电端机将电信号（数字信号）送入光端机。光端机包括光发送端机和光接收端机。光发送端机是将电信号转换成光信号的光发射机，采用的光源是半导体激光器（LD）或半导体发光二极管（LED），它们都是通过加正向偏置电流而发光的半导体二极管，所不同的是 LD 发出的是激光，而 LED 发出的是荧光。

光发送端机将已调制的光波送入光缆（光纤），经光缆（光纤）传送至光接收端机。光接收端机是将光信号转换成电信号的光接收机。光信号经过光缆（光纤）传输到达接收端，首先经光电二极管（PIN 或雪崩光电二极管 APD）检波变为电脉冲，然后经放大、均衡、判决等适当处理，恢复为送入发送端的电信号，再送至接收电端机。

模拟光纤通信系统的示意方框图如图 1-3 所示。

在图 1-3 中，前端设备就是有线电视（CATV）中的电视发送设备，它将所传输的信号进

行处理或调制，组成基带信号或者按频分多路复用（FDM）方式送至光发射机，光发射机将该电信号转换成光信号送入光缆（光纤）。由于是模拟电信号，光发射机采用的光源通常是分布反馈式（Distributed Feedback, DFB）激光器，其线性度比较好。

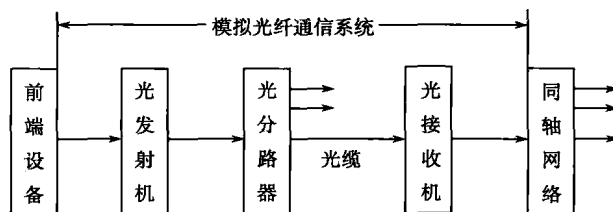


图 1-3 模拟光纤通信系统的基本构成

光分路器将光发射机的输出光信号分成几路。

光接收机将接收到的光信号转换成电信号进行处理，恢复原信号。然后该电信号进入同轴分配网络。

以上就是整个光纤通信的过程。它与一般通信过程所不同的主要有两点：一是传输的信号为光信号；二是利用光纤作为媒质传输手段。强度调制-直接检波系统结构简单，是目前光纤通信所普遍采用的形式。

1.5 光纤通信系统的应用

光纤通信系统的应用领域很广泛，归纳起来，目前大致在下述几方面用得较多。

1. 用于市话中继线

据统计，市话中继线大都在 10~15 km 以内，且地下管道普遍拥挤，随着城市的发展，市话业务量大增，又无法新建地下管道。而光纤通信的优点在这里可以充分发挥作用，今后，光纤通信将逐步取代电缆，得到广泛应用。

2. 用于长途干线通信

在长途通信方面，过去主要靠电缆、微波、卫星通信，现已逐步使用光纤通信并形成了占全球优势的比特传输方法。英国现在长途业务量的 70% 由光纤系统传输，国际上目前总计则超过了 50%。在经济方面，光纤系统具有固有的廉价成本和技术上的先进与成熟，正在逐步取代电缆。截止到 2007 年底，我国光缆总长度居世界第一位，达到 718.7 万公里，光纤总长度达到 15500 万公里。光纤通信对我国的通信发展起着重要的作用。

3. 用于高质量彩色电视传输

目前，在光纤模拟信号传输系统中，传输宽频带电视信号占较大比重，其中 BB-IM、PFM-IM 系统彩色电视的传输质量可全面达到国家标准甲级技术指标。广泛用于广播电视台彩电中心至发射台或微波站、卫星地面站之间的光纤短程线。

4. 用于工业生产现场监视和调度

大型工矿企业的工业生产线很长,情况复杂,由总调度室对生产现场全线监视,保证安全生产,合理调度,及时发现问题并及时处理,对保证产品质量,减少事故造成的损失意义重大,尤其调度室距生产现场较远且工业干扰较大时,必须采用光纤传输。

5. 用于交通监视控制指挥

随着城市的现代化,高速公路、地铁和市内交通都变得拥挤,为了提高车辆运行效率,交通管理部门必须加强管理,为了提高车辆流速、减少交通事故,目前都采用最新的光通信技术和计算机技术,实现在指挥室指挥十几公里甚至几十公里外的车辆。

6. 用于城镇有线电视网、共用天线(CATV)系统

目前城镇有线电视正在我国各大中城市兴起,发展迅速,CATV 闭路电视系统也日渐普及。这类系统干线距离较长,覆盖面较大,传输节目数较多,因此对光纤多路电视传输系统的需求越来越迫切,尤其是干线、超干线传输,必须采用光缆传输。

7. 用于光纤局域网

如计算机数据传输、计算机网、光纤用户线等。

8. 用于特殊场合

如飞机内、飞船内、舰艇内、矿井下、电力部门、军事部门,以及有腐蚀或有辐射等场合中使用。

随着社会的发展,人类将进入信息化社会,所有信息将存入信息库,实行信息共享。在这一发展过程中,宽带综合业务局域网将得到发展,而光纤模拟视频分配系统将以成本低廉、实用而得到重视,多路电视、数据信道将进入用户,宽带用户光纤系统必将发展普及。

1.6 现代光纤通信技术角色

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。

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,大约每两年就要翻一番,原有的光纤通信系统的传输容量已经成了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,波分复用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。

2. 光集成器件和光电集成器件的研究

如同电子集成器件那样,也可以将许多光学器件(特别是半导体的光器件,如半导体激光

器、光检测器等)集成在一个衬底上,各器件用半导体光波导互联,制成光集成器件。光电集成器件具有体积小、速度高、可靠性高等优点,发展光集成是光纤通信的必然。

3. 新类型光纤的研究

传统的 G. 652 单模光纤在适应上述超高速长距离传送网络的发展需求方面已暴露出力不从心的态势,开发新型光纤已成为开发下一代网络基础设施的重要组成部分。目前,为了适应干线网和城域网的不同发展需要,已出现色散位移光纤、色散补偿光纤、无水吸收峰光纤(全波光纤)和还尚未成熟的光子晶体光纤等。此外,为了满足接入网方面的需要,聚合物光纤也应运而生。

4. 解决全网瓶颈的手段——光接入网

光接入网是信息高速公路的“最后一公里”。实现信息传输的高速化,满足大众的需求,不仅要有带宽的主干传输网络,用户接入部分更是关键,光接入网是高速信息流入千家万户的关键技术。目前应用于光接入网的技术主要有 3 种,即 SDH、PDH 和无源光网络(PON)。

➤ 习题

- 1-1 实现光纤通信的关键器件与技术是什么?
- 1-2 光纤通信使用光源的波长范围是什么?
- 1-3 光纤通信有哪些优点?
- 1-4 数字光纤通信系统由哪几部分组成?简述各部分的作用。
- 1-5 模拟光纤通信系统由哪几部分组成?简述各部分的作用。
- 1-6 光纤通信的应用范围主要是哪些领域?

第2章 光纤和光缆

光纤和光缆是光纤通信的传输媒介。本章介绍光纤传输的基本原理、光纤的结构以及光缆的结构和应用。

2.1 光纤的优点

通信用光纤与其他通信线相比,具有许多独特的优越性。光纤是一种细长(直径大约为0.1 mm)的玻璃纤维,全称为光导纤维。若使光从一根光纤的端部射入,就可以把光波封闭在这根很细的“玻璃丝”内进行传播。这正像电流在铜线中传输一样。如果对玻璃纤维进行加工,包括涂覆、成缆等,并进行与电缆同样的工艺处理,就能够使其作为传输光信号的线路。光纤通信之所以引人注目是因为光纤能解决电缆在传输过程中许多难以解决的问题,因而具有普通电缆所不具备的独特优点。

1. 传输频带宽、容量大

光纤传输是以光波作为载波,而光波的频率范围极宽,大约为 $10^{12} \sim 10^{16}$ Hz。目前,在短波长区光纤通信使用的频率范围一般为 3.5×10^{14} Hz(波长为 $0.85 \mu\text{m}$),如果我们只利用其带宽的1%,也有 3.5×10^{12} Hz,一个话路只占用4 kHz带宽,这样一对光纤就可以传输 87.5×10^7 路电话。可是,由于实际技术水平的限制,在实用中要达到这样的高水平尚有困难。目前的实用水平是每对光纤传25 000个话路(1.6 Gbit/s),比现在传统的1 800路所用的同轴电缆的容量大得多。如果再使用波分复用技术,其传输容量将更会大得惊人。

2. 传输损耗低

目前实际应用中的光纤一般是用石英玻璃制成的,其传输损耗可低于0.5 dB/km,它比其他任何传输介质的损耗都要低。图2-1示出了各种传输介质每公里的传输损耗。

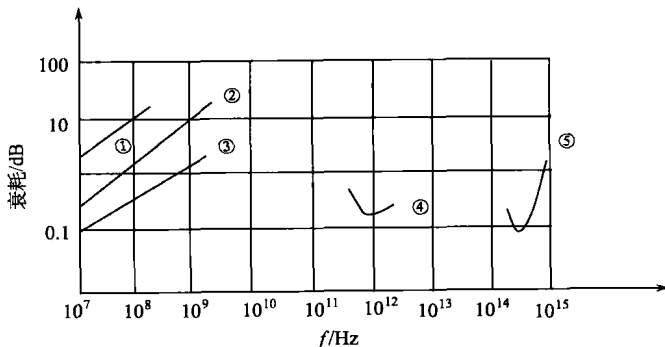


图 2-1 传输介质的损耗特性

① $\Phi 0.05$ mm 对称电缆；② 标注同轴电缆；③ 38 mm 海底同轴电缆；④ 51 mm 电波；⑤ 光纤

由图 2-1 可见，光纤在某一频段（0.7~1.8 μm 波段）内的损耗比其他介质都低，尤其是在 1.5~1.6 μm 附近，每公里损耗仅为 0.2 dB。由于光纤具有如此低的传输损耗，因此由光纤组成的通信系统，传输的中继距离可以达到 100 km 以上，而 10 800 路电话通信或 400Mbit/s 数字通信中的同轴电缆每隔 1.6 km 就需设立中继站，同样，微波通信的中继距离也只有 50 km 左右，比光纤通信系统小得多。

3. 直径小、质量轻、富于挠性

光纤很细，质量很轻，便于搬运和施工。成缆后，6~12 芯光缆外径约 12 mm，重量约为 150 kg/km；而标准同轴电缆外径为 47 mm，18 管同轴电缆重量约为 11 t/km。

表 2-1 给出了光缆和以往标准电缆重量的比较，铅包电缆的铅重量所占得比例大，它和光缆有明显的差别。

表 2-1 光缆与电缆的重量比

	同轴电缆（18 芯）	对称电缆（100 芯）
光缆	90 g/m 11 kg/m	200 g/m 1.1~2.9 kg/m

光纤虽细，但抗强性很好，理论上，断裂强度平均可达 7 kg/m 之多，如果用单位面积上的强度来表示，这相当于铜的十多倍。

光纤柔软，可弯曲，即使弯成直径 2 mm 左右的圆形也不会断裂，但不能进行锐角弯曲。

4. 抗干扰和化学腐蚀

光纤不导电，不会受高压电线、无线广播和雷电等电磁干扰，不需要采用以往铜线电缆中所用的铅屏蔽、钢带屏蔽或电缆穿入导管内等防感应的措施。同时光纤中传输的光波也不会干扰外界，不会像金属线那样发生火花放电现象。另外石英光纤可抗化学腐蚀，在有腐蚀的地方可以敷设光缆。

5. 资源丰富

石英光纤的主要原料是 SiO_2 ，它是地壳中含量最丰富的物质，在地球上 Si 与 O_2 可以说是取之不尽、用之不竭的。若生产 10^6 km 光纤，石英的消耗量只有 27 t(27 g/km)，而掺杂剂锗只需 500 kg(0.5 g/km)。相反铜只占我国矿产资源的 0.1%，目前已经供不应求。

2.2 光纤的基本传输理论

光纤为什么能导光呢？为了说明这个问题，首先简要介绍一下光在介质中的传输特性。我们知道光具有波粒二重性，就是说我们既可以将光看成光波，也可以将光看成是由光子组成的粒子流。因此，在描述光的传输特性时，相应地有两种理论：波动理论与射线理论。前者描述起来比较复杂，需要用麦克斯韦方程求解，但它能精确地描述光的传输特性；后者描述起来比较简单直观，易于理解。

2.2.1 射线理论法分析光在光纤中的传输

光纤的外径一般为 $125\sim 140\ \mu\text{m}$ ，它是利用光的全反射原理来传光的。光纤是由折射率较大的纤芯（折射率为 n_1 ）和折射率较小的包层（折射率为 n_2 ）构成的，纤芯的作用是传导光波，包层的作用是将光波封闭在光纤中传播，纤芯的折射率 n_1 要大于包层的折射率 n_2 以形成全反射，这样，才能使光波在光纤中顺利传播，同时，在光纤弯曲的曲率半径不是很小时，可以引导光波沿光纤转弯，此时光也不会跑到包层去。

光纤按纤芯折射率的分布分为阶跃型光纤和渐变型（梯度型）光纤。阶跃型光纤的纤芯有均匀的折射率 n_1 ，并且 n_1 高于其外侧包层的折射率 n_2 ，纤芯和包层的折射率分布有明显的分界面，光线在此界面上产生全反射，并且形成锯齿形传输路径。渐变型光纤则不同，在其截面上折射率是连续变化的，轴中心的折射率最大，沿纤芯半径方向折射率按抛物线规律减小，在纤芯边缘的折射率最小，迫使光线在纤芯内传输，自动地向轴线方向靠拢（聚焦），形成蛇形曲线传播，如图 2-2 所示。

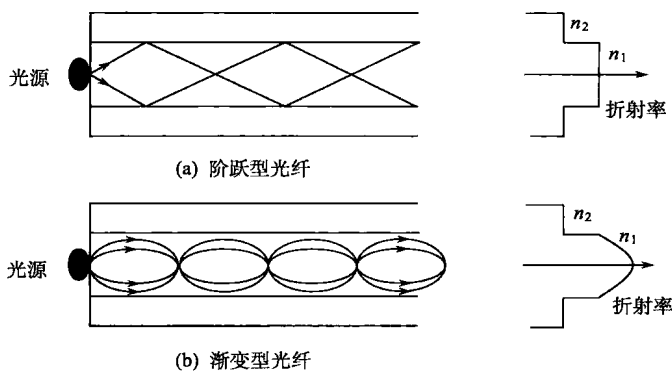


图 2-2 阶跃型光纤和渐变型光纤中光的传输路径

上面简要介绍了光在光纤中的传播，为了更具体地说明问题，下面首先讨论光在均匀折射率纤芯（阶跃型光纤）中的传播，图 2-3 表示阶跃型光纤的轴向截面和光线传播情况。

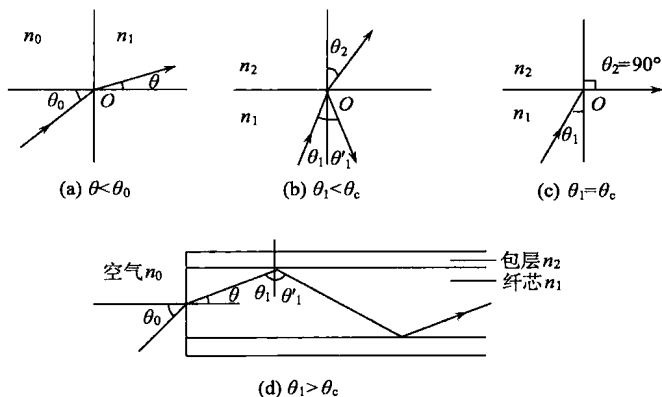


图 2-3 光在阶跃型光纤中的传播

如图 2-3 (a) 所示, 光从空气入射到光纤端面中心的人射角为 θ_0 , 光纤内的折射角为 θ , 根据折射定律, 有

$$n_0 \sin \theta_0 = n_1 \sin \theta \quad (2-1)$$

因为空气的折射率 $n_0=1$, 所以有 $\sin \theta_0 = n_1 \sin \theta$, 又因为玻璃的折射率 $n_1=1.458$, 所以有 $\theta < \theta_0$ 。

如图 2-3 (b) 所示, 当光从纤芯射至包层时, 入射角为 θ_1 , 反射角为 θ'_1 , 折射角为 θ_2 , 它们仍服从光的反射与折射定律, 即 $\theta_1 = \theta'_1$, $n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$ 。可见, 折射光将在靠近纤芯与包层的界面中传播, 反射光将回到纤芯中, 然后又射向纤芯的另一边的纤芯与包层界面, 此后重复入射点 O 的情况, 使光向前传播。在这种情况下, 由于入射光有一部分反射, 另一部分通过界面进入包层并且被衰减掉, 因此经过多次反射后, 入射光的能量将很快衰减, 导致光波不能实现远距离传输。

由于纤芯的折射率 n_1 略大于包层的折射率 n_2 , 所以 $\theta_1 < \theta_2$, 如图 2-3 (c) 所示, 将入射角 θ_1 增大到某一角度时, 折射角 $\theta_2 = 90^\circ$ 。此时, 光线将不进入包层而是沿纤芯与包层之间的界面向前传播, 这种情况下的入射角 θ_1 称为全反射临界角, 用 θ_c 表示, 此时 $\theta_1 = \theta_c$, 即 $\sin \theta_c = n_2 / n_1$ 。

如图 2-3 (d) 所示, 当增大光线的入射角使 $\theta_1 > \theta_c$ 时, 因为 $\theta + \theta_1 = 90^\circ$, 所以 θ 应小于 $90^\circ - \theta_c$, 这样就要求光从空气中入射到光纤的入射角 $\theta_0 < \theta_c$, 这就保证了光从纤芯射向纤芯与包层界面时, 会从界面全部返回纤芯产生全内反射, 就使光线封闭在纤芯内, 以多次全反射的方式呈“之”字形向前传播, 光不能泄露到纤芯以外的空间, 从而实现了光波的远距离传输。

从上面的分析可知, 光线从纤芯射至与包层的界面实现全反射的条件如下。

(1) 纤芯的折射率 n_1 一定要大于包层的折射率 n_2 。

(2) 进入光纤中的光线向纤芯与包层之间的界面入射时, 入射角 θ_1 应大于临界角 θ_c , 换句话说, 光从空气入射到光纤的入射角 θ_0 应小于 θ_c 。因为每根光纤的包层与纤芯的折射率之比不同, 所以它们发生全反射的临界角也不同。

现在再来讨论光能够从空气射入光纤的条件, 当光纤端面平整为镜面时, 这时光是从低折射率介质向高折射率介质传播, 光在光纤端面的反射很小, 可以忽略不计, 如图 2-4 所示。

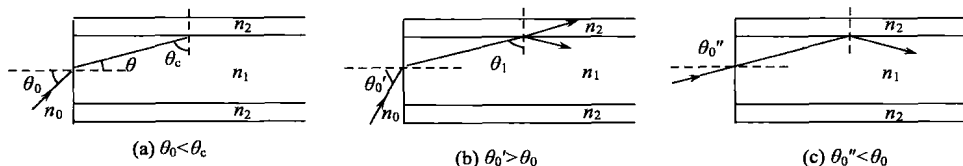


图 2-4 光自空气射入光纤的条件

首先分析图 2-4 (a), 根据折射定律有

$$n_0 \sin \theta_0 = n_1 \sin \theta \quad (2-2)$$

由图可知折射角 $\theta = 90^\circ - \theta_c$, 所以有

$$n_0 \sin \theta_0 = n_1 \sin(90^\circ - \theta_c) = n_1 \cos \theta_c$$

又因为 $n_0=1$, 所以有

$$\sin \theta_0 = n_1 \cos \theta_c \quad (2-3)$$