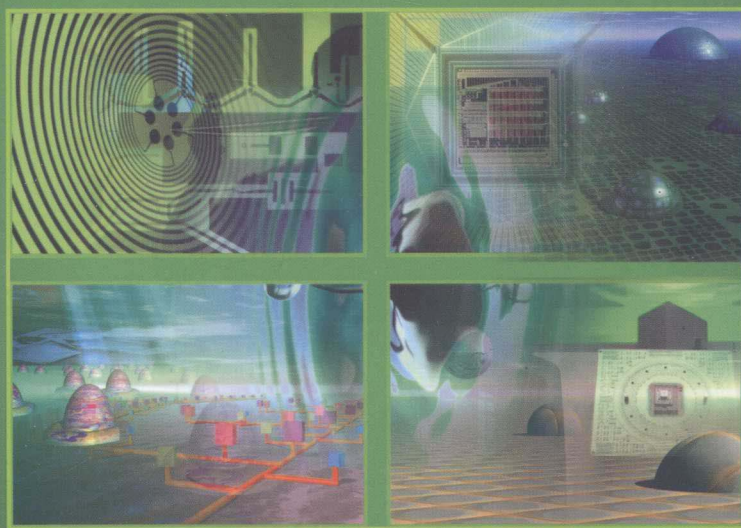


❖ 普通高等教育电子信息类规划教材 ❖

光纤通信技术

OPTICAL FIBER
COMMUNICATIONS TECHNOLOGY



彭利标 等编著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



本书赠送电子教案
www.cmpedu.com

本书主要包括光纤通信系统概况,光的传播特性,光纤与光缆,光纤通信用光发射器件(LED和LD及其组件/模块)、光接收器件(PIN和APD及其组件/模块),光调制、编码、复用和解复用技术,光放大技术,光无源器件,数字光纤通信系统的数字系列及传输制式,多信道复用技术等。

本书在编排上力求系统性、实时性和实用性。选取了光纤通信技术的新素材,反映了当前光纤通信技术的发展水平,理论分析深入浅出,文字叙述通俗易懂,图文并茂,注重实用,避免了繁琐的数学推导,适合不同层次读者的需要。

本书可作为通信及信息类专业的应用型本科教材,也可作为高等职业院校、高等专科学校、成人高校等电子信息、通信工程及相关专业的教学用书,也可供从事光纤通信系统和网络研究、规划、设计、建设、使用、管理和维护的相关人员参考,还适合于光电子器件和光纤通信产品销售及可靠性研究的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

光纤通信技术/彭利标等编著. —北京:机械工业出版社,2012.10

普通高等教育电子信息类规划教材

ISBN 978-7-111-39752-6

I. ①光… II. ①彭… 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(2012)第218111号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:李馨馨 责任编辑:李馨馨

封面设计:鞠杨 责任印制:李妍

中国农业出版社印刷厂印刷

2012年10月第1版第1次印刷

184mm×260mm·20.5印张·507千字

0001—3000册

标准书号:ISBN 978-7-111-39752-6

定价:39.80元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心:(010)88361066

教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售一部:(010)68326294

机工官网:<http://www.cmpbook.com>

销售二部:(010)88379649

机工官博:<http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线:(010)88379203

封面无防伪标均为盗版

前 言

光纤 (Optical Fiber) 是目前现代通信网络的最佳信息传输媒质; 光纤通信 (Fiber Communication) 是信息社会的支柱; 光纤通信网络 (Fiber Communication Network) 是信息高速公路的骨干网, 是用户接入网, 也是全球通信今后发展的主体。

近年来, 光纤通信技术凭借其自身的优越性及相关学科的支持, 得到了飞速发展, 在人类向信息社会迈进的过程中扮演着越来越重要的角色。总观推动当今电信业发展的主要技术, 很少有像光纤传输系统这样能够引发如此剧烈的通信变革的通信系统。光纤通信技术的迅速发展和广泛应用, 不仅极大地提高了系统信息的传输容量, 给通信领域带来翻天覆地的变化, 而且与卫星通信、移动通信一起构成以光纤通信为主体的长途通信三大支柱。

20 世纪 90 年代中期以前推出的光纤通信系统是以电时分复用为基础的单信道系统, 借助于这样的系统, 可将传输速率每 5 年提高 9 倍。波分复用 (WDM) 技术和掺铒光纤放大器 (EDFA) 的实用化更是使光纤通信面目一新。1996 年首次实现了 1 Tbit/s 的传输速率, 同时也使建立以波长路由为基础、具有高度灵活性和生存性的 WDM 全光通信网成为可能, 光交叉连接、光分插复用的概念应运而生。除此之外, 新型的光电器件、新兴技术和新型的系统也都层出不穷, 获得迅速发展。

本书是为了培养应用型本科电子信息类人才而编写的教科书, 是由全国高等学校教学研究中心, 于 2008 年发起的“我国高校应用型人才培养模式研究”中, “应用型人才电子信息类专业《光纤通信技术》课程创新与实践”的成果之一。结合应用型人才特点和要求, 在结构上做了一些新的尝试, 即“理论 + 实验 + 课外调研 + 实训”。在内容上, 不仅介绍光纤、光缆、光器件等的基本概念、工作原理, 而且结合工程应用, 介绍光纤通信系统工程方面的知识, 例如, 光缆选型、再生段计算、光纤接续等, 同时安排了课外调研项目要求和实训环节, 以培养学生的专业素质, 特别是实践技能。

本书在讲述中力求理论体系的系统性和完整性, 采取概念论述和简单数学推导相结合的方法, 循序渐进、由浅入深地对光纤的传输理论、光源和光调制、光接收机的原理进行了较深入的讲述。第 1 章光纤通信技术概论, 主要介绍光纤通信技术的发展, 光纤通信系统的组成, 光纤通信系统的特点及分类, 以及与光纤通信技术有关的产品。第 2 章光的传播特性, 主要介绍光的基本性质, 几何光学, 光的量子性, 光电效应及激光原理等。第 3 章光纤与光缆, 主要介绍光纤的结构类型, 光纤的传输原理、传输特性, 如衰减特性、色散特性、非线性等, 还介绍了几种典型的光纤和光缆。第 4 章光源和光发射机, 主要介绍光纤通信对光源的基本要求, 光源的发光原理, LED 和 LD 及其组件的结构特点, 光的调制方法, 常用的光调制器以及对光源的保护等。第 5 章光中继传输, 介绍了几种典型的光纤放大器, 重点是掺铒光纤放大器, 介绍了光纤放大器的典型应用, 使用时的注意事项, 光纤放大器的主要参数等。第 6 章光电检测与光接收机, 介绍了光电探测原理及常用参数计算, 常用的光电探测器件, 如 PIN 光敏二极管, 雪崩光敏二极管, 集成光学光电探测器等, 还介绍了光接收组件, 包括模拟和数字光接收组件, 光收发一体组件, 光接收机的组成及主要性能指标。第 7 章光

纤通信系统，主要介绍了数字光纤通信系统的数字序列，光纤通信线路编码，光同步传输网，SDH 的速率等级和帧结构，光纤通信系统的性能指标等。第 8 章多信道复用和交换技术中主要介绍调制、信道复用、光调制技术、光波分复用、光时分复用、光码分复用。第 9 章光纤通信工程，讲述了系统组成形式，设计时的注意事项，几种常用网络形式的功率和色散预算，以及光端机设备举例等。第 10 章光纤通信新技术简介，主要内容包括相干光纤通信系统、光孤子通信技术、全光网络等。

光纤通信已成为当今信息社会不可缺少的神经系统，其发展仍存在着巨大的潜力和空间。鉴于光孤子通信系统目前尚不成熟，所以本书中只简单进行了概念介绍。

本书总体结构的策划由天津通信广播集团公司总工程师马严负责，第 2 章由马严编写，第 10 章由天津光电集团公司总工程师管学斌编写，其余各章由天津理工大学中环信息学院的彭利标编写，并由彭利标担任主编，负责全书的统稿工作。天津大学的葛春风博士担任主审。参加本书编写的还有王奉良、田野、李冰玉、郝芸。在编写过程中，本书选取了光纤通信技术的最新素材，收编了大量有价值的光纤通信工程数据和图表，作者希望本书能够对光纤通信的发展有所帮助。虽然作者多年来从事光纤通信的教学和技术研究，但由于光纤通信技术发展十分迅速，加之作者水平有限，书中难免存在不妥之处，敬请读者批评指正。

本书参考了一些有关的书籍、资料，并得到相关企业和技术人员的关怀和指导，在此一并表示感谢。

编 者

目 录

前言

第1章 光纤通信技术概论	1
1.1 光纤通信技术简介	1
1.1.1 概述	1
1.1.2 光纤技术的发展	2
1.1.3 光电网络的性能特点	4
1.1.4 有关光网络的关键性技术	7
1.2 光纤通信系统的组成	8
1.2.1 光纤通信系统的工作过程	8
1.2.2 光纤通信系统的典型应用	9
1.3 光纤通信系统的分类	10
1.3.1 不同波长的光纤通信系统	10
1.3.2 单模和多模光纤通信系统	10
1.3.3 数字和模拟光纤通信系统	11
1.3.4 不同调制方式的光纤通信系统	12
1.3.5 按传输信道数目划分	12
1.3.6 按应用范围划分	13
1.3.7 其他形式的光纤通信系统	13
1.4 光纤通信技术有关的产品	13
1.4.1 光传输设备	14
1.4.2 光纤光缆及其附件	14
1.4.3 光器件	14
1.4.4 光纤通信测试仪器与专用工具	15
1.5 习题	18
调研项目：光纤技术的发展现状	19
实验1 信号的 E-O、O-E 转换	20
第2章 光的传播特性	21
2.1 几何光学	21
2.1.1 光的反射和折射	21
2.1.2 光的传播	24
2.2 光的电磁理论	27
2.2.1 麦克斯韦波动方程	27
2.2.2 平面电磁波	27

2.2.3 球面波	28
2.2.4 电磁波的性质	29
2.3 光的量子性	31
2.3.1 光电效应	31
2.3.2 光的波粒二象性	32
2.4 光源的发光原理	33
2.4.1 原子能级	33
2.4.2 激光的形成	36
2.5 习题	39
调研项目：几种典型激光器的调查研究	41
实验2 语音、图像的光纤传输	41
第3章 光纤与光缆	43
3.1 光纤的结构与类型	43
3.1.1 光纤的结构	43
3.1.2 光纤的种类	44
3.1.3 常用光纤的传输特征	45
3.2 光纤的传输原理	49
3.2.1 光传输的基本特性	49
3.2.2 单模光纤的基本特性	54
3.3 光纤的传输特性	55
3.3.1 光纤的衰减特性	56
3.3.2 光纤的色散特性	59
3.3.3 光纤的非线性效应	62
3.4 光纤的拉制	63
3.4.1 预制棒的制作	64
3.4.2 光纤的拉制	66
3.4.3 光纤的几何特性	67
3.5 几种常用光纤	67
3.5.1 几种常用的光纤及特点	67
3.5.2 光纤的选择	71
3.6 光纤的成缆及选用	73
3.6.1 光缆的使用寿命	73
3.6.2 光缆结构及类型	74
3.6.3 光缆型号命名方法	78
3.6.4 光缆的选用	81
3.7 习题	83
调研项目：光纤光缆产品市场调查	85
实验3 光纤传输特性的测试	85

第4章 光源和光发射机	87
4.1 光发射机概述	87
4.1.1 光纤通信系统对光源的基本要求	87
4.1.2 光纤通信中常用的光源	88
4.2 LED 及组件	88
4.2.1 LED 的结构	89
4.2.2 LED 的发光过程	90
4.2.3 LED 的分类	91
4.2.4 LED 的工作特性	95
4.2.5 LED 组件	96
4.3 LD 及组件	96
4.3.1 半导体激光二极管	97
4.3.2 LD 的分类	97
4.3.3 LD 结构及发光过程	98
4.3.4 半导体激光器的工作特性	99
4.3.5 半导体激光器的噪声	102
4.3.6 激光二极管组件	103
4.4 光的调制	105
4.4.1 信号对光源的调制	105
4.4.2 常用的光调制器	114
4.4.3 光调制器主要参数及应注意的问题	115
4.4.4 对激光器的保护	116
4.5 光发射机的组成	117
4.5.1 光发射机的结构组成	118
4.5.2 光发射机的主要性能指标	119
4.5.3 典型光发射机实例	120
4.6 习题	122
调研项目: 新型半导体激光器技术	124
实验4 光源的 $P-I$ 特性测绘与 APC 分析	124
第5章 光中继传输	126
5.1 光-电-光中继器	126
5.1.1 光-电-光中继器结构	126
5.1.2 全光中继器	127
5.2 光放大中继器	128
5.2.1 常规传输光纤放大器	128
5.2.2 半导体光放大器	128
5.2.3 稀土掺杂光纤放大器	130
5.3 掺铒光纤放大器	131

5.3.1	EDFA 的泵浦特性	131
5.3.2	掺铒光纤放大器的特点	133
5.3.3	EDFA 的组成结构	133
5.3.4	EDFA 的应用形式	136
5.3.5	EDFA 的特性参数	138
5.4	光无源器件	140
5.4.1	光纤连接器	141
5.4.2	光纤耦合器	147
5.4.3	光纤滤波器	148
5.4.4	波分复用/解复用器	153
5.4.5	光衰减器	155
5.4.6	光隔离器	157
5.4.7	光开关	159
5.4.8	其他光学器件	161
5.5	习题	163
	调研项目: 光放大器与光无源器件的现状调查	165
	实验 5 数字信号的 TDM 复用/解复用	166
第 6 章	光电检测与光接收机	167
6.1	光电检测原理	167
6.1.1	半导体的光电效应	167
6.1.2	光电检测器的工作特性参数	168
6.2	光电检测器件	171
6.2.1	PIN 光敏二极管	171
6.2.2	雪崩光敏二极管	173
6.2.3	肖特基光敏二极管	175
6.2.4	MSM 光电检测器	176
6.2.5	集成光学光电检测器	176
6.3	光接收组件	178
6.3.1	光接收组件的基本组成	178
6.3.2	光接收组件的特性	179
6.3.3	模拟光接收组件	181
6.3.4	数字光接收组件	181
6.4	光发射接收模块	182
6.4.1	光发射模块	182
6.4.2	光接收模块	184
6.4.3	光收发一体模块	188
6.5	光接收机	190
6.5.1	光接收机的组成及作用	190

6.5.2 光接收机的主要性能指标	191
6.6 习题	193
调研项目: 典型光端机技术分析	195
实验6 光端机的参数测试	196
第7章 光纤通信系统	197
7.1 数字光纤通信系统	197
7.1.1 输入电端机	197
7.1.2 数字光纤通信系统的数字系列	200
7.1.3 监控系统	203
7.2 光纤通信线路编码	205
7.2.1 码型转换	205
7.2.2 常用光纤线路码型	209
7.3 传输制式的讨论	216
7.3.1 传输体制概述	216
7.3.2 光同步传输网	218
7.3.3 SDH 的速率等级和帧结构	219
7.3.4 SDH 设备简介	221
7.4 光纤通信系统的性能指标	222
7.4.1 误码性能及测量	222
7.4.2 抖动性能及测量	225
7.5 习题	227
调研项目: 线路编码情况的调查研究	229
实验7 光纤通信线路编/译码	229
第8章 多信道复用与交换技术	231
8.1 光复用技术	231
8.1.1 几种常用的光复用方法	231
8.1.2 光时分复用	232
8.1.3 光波分复用	235
8.1.4 光码分复用	239
8.1.5 副载波复用	239
8.1.6 空分复用	240
8.2 光交换技术	240
8.2.1 空分光交换	240
8.2.2 时分光交换	242
8.2.3 波分光交换	242
8.2.4 复合光交换	243
8.3 光调制技术	243
8.3.1 几种调制方法	244

8.3.2 信号强度调制	245
8.3.3 相干系统调制	247
8.4 扩频通信	247
8.4.1 扩频通信概述	248
8.4.2 伪随机码	250
8.4.3 几种常用的扩频方式	251
8.5 习题	254
调研项目：光复用和光调制技术的调查研究	256
实验8 波分复用（WDM）光纤通信系统	257
第9章 光纤通信工程	259
9.1 光纤通信工程设计	259
9.1.1 系统设计概述	259
9.1.2 光纤通信系统设计内容	261
9.1.3 光纤通信系统的常用结构类型	266
9.1.4 系统设计方法	271
9.1.5 系统的设计限制	272
9.1.6 功率预算和色散预算	273
9.2 典型光纤通信系统设计	276
9.2.1 音频广播式系统设计	276
9.2.2 CATV 系统设计	276
9.2.3 数字光纤通信系统的设计	282
9.2.4 DWDM 系统工程设计	284
9.3 光纤通信工程的施工	286
9.3.1 光缆的敷设	286
9.3.2 光缆的接续	289
9.4 端机设备安装	290
9.4.1 端机设备的安装	290
9.4.2 光端机的组成	290
9.5 系统的调试与开通	294
9.5.1 调试与验收	294
9.5.2 工程验收	294
9.6 习题	295
调研项目：市话光纤数字传输系统工程设计的调查研究	296
光纤传输系统实训	297
实训1 光缆的分类与色谱分析	297
实训2 光纤光缆的接续	298
第10章 光纤通信新技术简介	299
10.1 相干光纤通信系统	299



10.1.1 相干光纤通信系统的组成	299
10.1.2 相干光纤通信的优点	302
10.1.3 相干光纤通信系统的关键技术	303
10.2 光孤子通信技术	304
10.2.1 光孤子的概念	304
10.2.2 光纤孤子通信	305
10.3 全光通信	307
10.3.1 全光通信网	307
10.3.2 全光通信网基本构成	308
10.4 习题	311
附录	312
附录 A 常用物理常数	312
附录 B 损耗百分数 (%) 与分贝 (dB) 的换算	312
附录 C 常用单位换算关系	313
附录 D 光功率单位换算表	313
附录 E PDH 和 SDH 速率等级	314
附录 F ITU-T 对于 WDM 系统波长的安排	315
参考文献	316

第1章 光纤通信技术概论

通信技术的发展过程，就是围绕着增加信息传输的速率和传输距离，提高通信系统的有效性、可靠性和经济性而展开研究的。光纤通信系统就是利用激光作为信息传输的载波，通过光导纤维来传输信息的通信系统。

1.1 光纤通信技术简介

光纤（Optical Fiber）是目前现代通信网络中信息的最佳传输媒质，光纤通信是信息社会的主要支柱，光纤通信网是信息高速公路的骨干网，也是全球通信今后发展的主体项目。所以光纤通信技术是信息技术（Information Technology, IT）产业的重要组成部分。

1.1.1 概述

光纤通信作为一种新兴的通信技术，一开始就引起人们的极大兴趣和关注，主要是因为光纤通信有比较突出的优点：光波频率很高，其波长在近红外区，即波长在 800 ~ 1800 nm 左右（有时光纤通信技术也视为纳米通信技术）；对应的频率为 167 ~ 375 THz (10^{14} Hz 数量级)；光纤传输带宽很宽，故传输容量很大，可以进行图像、数据、传真、电话、打印、控制等多种业务，理论上在一根光纤中能传输上亿部电话或上万套电视节目；光信号不受电磁干扰，所以光纤线路可随高压电缆架空敷设，保密性好、不怕雷击、耐高温、抗腐蚀、不易受潮、工作十分稳定；光纤在传输光信号的过程中损耗很低，仅是电缆损耗的几十分之一；光纤通信可用于国防、电力、铁路、防爆等重要工作场所的通信；制造光纤的材料来源丰富，由于光纤采用非金属材料，所以可节约大量有色金属；光纤芯的直径很小，在微米 (μm) 数量级，所以光纤的重量轻、体积很小，可节省大量的原材料，而且光纤的可绕性也较好。正因为如此，光纤通信技术的发展十分迅速，在当今信息社会中具有举足轻重的地位，发展前景非常广阔。光纤通信是通信史上的又一次重大变革。

回顾和展望通信网络的发展，大致可分为三个阶段。第一阶段是早期的全电通信网（电信网），其网络中的各节点（Node）是用电（铜）缆互连在一起的，在网络节点内部是对电信号进行处理和交换。全电通信网是一种窄带网，其传输容量有限，典型代表网络就是低速以太网。目前，全电网络主要用于局域网（Local-area Network, LAN）。用光纤取代电缆作为信号的传输媒质后，所组成的通信网络称为电光网，它是通信网络发展的第二个阶段。电光网络仍然是在网络节点内部对电信号进行处理和交换，这种网络组成方式也就是目前正在广泛使用的网络组成形式。其工作过程是节点负责电信号处理，然后转换成光信号在光纤中传输，信号在传输过程中受到衰减等因素的影响，当衰减到一定程度时，再转换成电信号处理，然后再转换成光信号传输，即信号在传输和处理环节中要经过电-光-电（E-O-E）的转换过程。电光网络主要用于局域网（LAN）和城域网（Metropolitan-area Network, MAN）。若通信网络中所有节点被不间断的光缆（Fiber Cable）相连接，且各节点内部只对

光信号进行处理和交换,这就是将来第三个阶段的全光通信网。全光网络中信号的传输、放大、中继、存储、交换、复用、解复用等都是在光频范围内进行的。全光网络可用于局域网、城域网和广域网(Wide-area Network, WAN)。

就光纤通信技术而言,经过短短几十年的飞速发展,已从第一代 $0.85\text{ }\mu\text{m}$ 多模光纤系统,第二代的 $1.31\text{ }\mu\text{m}$ 多模光纤系统,过渡到第三代的 $1.31\text{ }\mu\text{m}$ 单模光纤实用系统,目前,第四代的 $1.55\text{ }\mu\text{m}$ 单模光纤系统已经广泛投入使用。

在通信系统中,人们所关注的是系统中信号的传输速率 B 和信息的中继传输距离 L ,通信系统的性能指标通常用系统的通信容量 C 的大小来反映,常用 BL 的乘积表示系统的容量,即

$$C = B \cdot L \quad (1-1)$$

式中, B (单位为 Gbit/s) 是信息传输的比特率; L (单位为 km) 是中继距离; 通信容量 C 的单位为 $\text{Gbit/s} \cdot \text{km}$, 光纤通信系统的通信容量极大。

【例 1-1】 某光纤系统的传输速率为 9953.280 Mbit/s , 最大无误码传输距离为 525 km , 试计算该段光纤的传输容量。

解: 该系统的传输速率 $B = 9953.280\text{ Mbit/s} = 9.953280\text{ Gbit/s}$, 无误码传输距离 $L = 525\text{ km}$, 由式 (1-1) 得该段光纤的传输容量

$$C = B \cdot L = 9.953280\text{ Gbit/s} \times 525\text{ km} = 5225.472\text{ Gbit/s} \cdot \text{km}。$$

1.1.2 光纤技术的发展

1964 年, 在英国 Harlow ITT (国际电话电报公司) 实验室工作的一位年轻的英籍华人工程师高锟 (C. K. Kao) 提出, 人们应该能够发送高速信息光脉冲到一根纤细的玻璃丝中, 并做了一系列实验, 证明了这一想法是可实现的, 图 1-1 是高锟博士在做光纤传输实验。当时光纤的损耗为 3000 dB/km , 高锟博士还指出, 只要设法消除玻璃中的杂质, 做出衰减低于 20 dB/km 的光纤是有可能的。后来这位英籍华人工程师高锟被誉为“光纤之父”, 并在 2009 年获诺贝尔物理学奖。1970 年, 美国康宁玻璃公司生产出 20 dB/km 的低损耗传输光纤, 同年, 贝尔实验室成功地研制了在室温下可连续工作的激光器。此后的研制中, 光纤的损耗不断降低, 1972 年降至 4 dB/km , 1973 年降至 1 dB/km , 1976 年降至 0.5 dB/km 。到目前为止, 小于 0.3 dB/km 的光纤已经被广泛使用。总揽全局, 光纤通信技术大致可分为三个发展阶段。

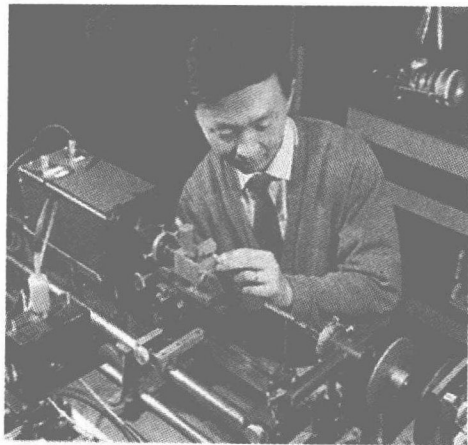


图 1-1 高锟博士在做实验

第一阶段是从1970~1979年,光导纤维与半导体激光器的研制成功,使光纤通信技术由起步逐渐成熟,并进入实用化阶段。在此阶段,光纤的传输质量不断提高,传输损耗逐年下降,带宽不断增加。在 $0.85\mu\text{m}$ 波段,光纤的传输损耗已降至 2 dB/km 左右。光纤的生产从带宽较窄的阶跃型折射率光纤转向带宽较宽的渐变型折射率光纤。另外,通信光源的寿命不断增长,光源和光电检测器件的性能不断改善,光纤和光电子器件的发展,为光纤传输系统的诞生奠定了基础。1976年美国亚特兰大的光纤市话局间中继系统可以称为世界上第一个光纤通信系统,当时其数据传输速率 B 为 44.763 Mbit/s ,传输距离 L 为 10 km 。

第二阶段是从1979~1989年,此阶段是光纤通信技术快速发展的年代,光纤技术取得了进一步突破,其传输损耗降到 0.5 dB/km 以下。光纤传输波长由 $0.85\mu\text{m}$ 波段迅速转向 $1.31\mu\text{m}$ 波段,由多模光纤转向单模光纤,由短波长向长波长转移。光纤数字系统的传输速率不断提高,光纤的连接技术和器件寿命等问题都逐步得到解决,光纤传输系统与光缆线路建设逐渐进入高潮。各种速率的光纤通信系统如雨后春笋般在世界各地建立起来,显示出了光纤通信的优越性,并很快替代了电缆通信系统,已成为电信网络中重要的传输手段。在此阶段,波分复用系统、相干光通信系统、光放大器等技术受到人们的关注,并投入了大量的人力和物力进行研究。

1989年至今为光纤通信技术的第三个发展阶段,光纤数字通信系统由准同步数字体系(Plesiochronous Digital Hierarchy, PDH)向同步数字体系(Synchronous Digital Hierarchy, SDH)过渡,数据传输速率进一步提高。20世纪80年代末,工作于 $1.55\mu\text{m}$ 波段的掺铒光纤放大器(Erbium-Doped Fiber Amplifier, EDFA)问世,给光纤通信技术带来巨大变革。EDFA的应用不仅解决了由于长距离传输光信号损耗,使信号衰减的问题,而且为光源的外调制、波分复用器件、色散补偿器件等提供能量补偿。这些网络元件的应用,又使得光纤传输系统的调制速率迅速提高,并促成了光波分复用(Wavelength Division Multiplexing, WDM)技术的实用化。由于掺铒光纤放大器工作在波长为 $1.55\mu\text{m}$ 波段,经过实验证明,在 $1.55\mu\text{m}$ 波段,光纤的传输损耗要比 $1.31\mu\text{m}$ 波段更低,从而使 $1.55\mu\text{m}$ 波段的光纤通信技术得到了更快发展。

在当今信息时代,通信业务和信息量突飞猛涨,通信道路越显拥挤,只有光纤通信才是解决信道拥挤的唯一出路,所以世界上所有新建的通信网干线,均采用光纤光缆作为传输媒质。为了满足系统带宽和传输容量的要求,一种方法是提高单信道系统的速率,1993年 2.5 Gbit/s 的系统已经实用化,1995年推出了 10 Gbit/s 的系统,因受电子速度等因素的限制,单信道速率要超过 40 Gbit/s 是很困难的;另一个方法就是发展波分复用(WDM)技术,20世纪90年代中后期,由于WDM技术和光纤技术的迅猛发展,光纤的信息传输速率迅速提高。1999年,阿尔卡特公司进行速率为 $32\times 10\text{ Gbit/s}$ 、传输距离为 400 km 的全光传输实验,2001年的OFC(光纤通信)会议上报道了实验室中单根光纤的传输速率已达到 10.92 Tbit/s 。2002年,阿尔卡特公司在C波段(常规波段)和L波段(长波段)又进行了传输速率为 10.2 Tbit/s 、传输距离为 $3\times 100\text{ km}$ 的传输实验。

通信网的两大组成部分是传输和交换。传输速率的提高,也给交换系统带来压力,电路交换逐渐被具有路由器功能的分组交换所取代。由于光放大和光中继、色散补偿、光纤非线性效应的抑制、光复用、光互联和光处理技术的发展和运用,光纤通信技术正朝着光交换和电信网络的全光化趋势发展。

由于光电子技术、现代通信技术和计算机技术的发展逐渐成熟,大批有关光纤通信产品的高新企业不断诞生,世界光纤市场和光电子器件市场需求大幅度增长,因此产品价格急剧下降。10 Gbit/s 的高速集成电路已经被开发出来,200 Gbit/s 的晶体管和 40 Gbit/s 的集成电路已逐渐成熟,光纤通信产业方兴未艾。光纤在 1280 ~ 1620 nm 的近红外波段具有 5 个低损耗传输窗口,采用密集型波分复用技术 (Dense Wavelength Division Multiplexing, DWDM),这 5 个传输窗口可提供多达 10000 个信道。因此所谓“通信线路是信号传输的技术瓶颈”的说法,自从使用了光纤、光缆作为传输媒质之后就不复存在了。

随着我国国民经济建设的持续、快速发展,通信业务的种类越来越多,信息传送的需求量也越来越大。我国光纤通信的产业规模在不断壮大,产品结构覆盖了光纤传输设备、光纤与光缆、光电子器件以及各类施工、测试仪器仪表与专用工具等。可以展望,光纤通信作为一种高新技术产业,将以更快的速度发展,光纤通信技术将逐步普及,光纤通信的应用领域将更加广阔,其前景将更加美好。为让大家更好地了解光纤通信技术的发展过程,图 1-2 给出了光纤通信技术及性能发展过程的简单示意图。

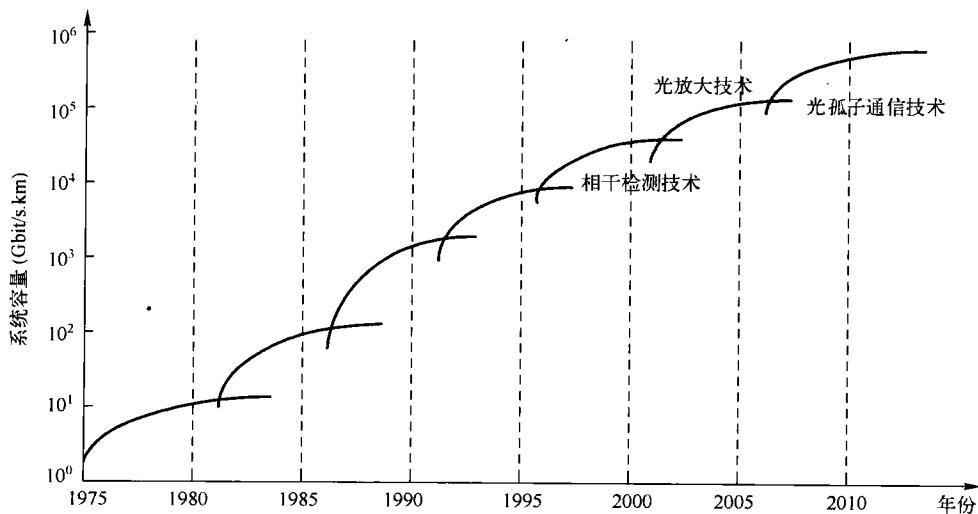


图 1-2 光纤通信技术及性能发展示意图

1.1.3 光电网络的性能特点

为什么电通信网络将要被光纤通信网络取代呢?这是因为电通信网络与光纤通信网络相比,有许多致命的缺点,现列举一些主要参数,以便进行比较,从而加深对光纤通信网络特点的了解。

1. 电通信网络存在的缺点

(1) 电磁干扰比较严重

由于电通信网络,特别是局域网(LAN)部件通常与交流电源或照明电路直接接触,LAN 电缆和部件上的静电荷积累,耦合到通信电缆系统上的高能量瞬变脉冲和高频电磁干扰、静电放电、LAN 部件各接地点之间的电位差等,这些危害和干扰都是由于电缆的导电性、电磁兼容性和屏蔽能力差所引起的。这些危害和干扰影响了通信网的正常工作,降低了通信质量,甚至导致 LAN 部件及联网计算机的损坏。

(2) 传输损耗大、带宽窄

为了更清楚、更方便地比较电缆与光缆的传输特性,表1-1中分别给出了电缆与光缆每公里传输损耗的分贝(dB/km)数或传输带宽。从表中的数据可以看出,电缆的损耗明显比光缆的损耗大得多,有的甚至大几个数量级。所以在信号传输过程中,特别是在网径(区域)较大的局域网(LAN)和城域网(MAN)中,只有使用光纤光缆作为传输材料才能远距离传输信号,减少传输线路上的损耗和中继设备数量。

(3) 保密性存在的问题

通信网络中,传输信息时的保密性能也是通信用户必须考虑的一个主要问题。当今社会,不但国家的政治、军事、经济情报等需要绝对保密,就是企业的经济和技术情报也可能成为竞争对手的窃取目标。局域网中信息窃取的方式常有以下几种:直接接入式窃听、窃听计算机和终端、电缆系统辐射的电磁场。对于直接接入式窃听方式,可采取保密口令、信息加密等安全技术来解决;而对于辐射的电磁场进行窃听,虽然可以采用加强电磁屏蔽技术的措施来加强防范,但电缆系统的完全屏蔽是不可能的。现代窃听技术可做到离同轴电缆几公里以外的地方来获取电缆中传输的信号内容,但对光缆的窃听却很困难,所以光纤通信系统要比电缆通信系统传输信号保密性能好得多。

(4) 电缆的体积大

由于电缆的线芯较粗,成缆后的体积、重量都较大,同时为了减少接地电位差,还必须慎重处理接地点、信号线的绝缘和屏蔽等问题,所以现场施工安装电缆时很不方便,特别是在空间狭小的场合更是如此。

表1-1 电缆与光缆的传输性能比较

传输媒质类型	频带或带宽距离积	损耗/(dB/km)
对称电缆	4 kHz 时	2.06
细同轴电缆(Φ1.2/4.4)	1 MHz 时	5.24
粗同轴电缆(Φ2.4/9.4)	1 MHz 时	2.42
0.85 μm 波长多模光纤	(200 ~ 1000) MHz · km	≤3
1.31 μm 波长多模光纤	≥1000 MHz · km	≤1.0
1.31 μm 波长单模光纤	100 GHz	0.36
1.55 μm 波长单模光纤	10 ~ 100 GHz	0.2

通信用的光纤是用石英玻璃或塑料制成的直径很细的纤维,其直径只有微米数量级,体积很小、重量很轻。光纤又是极好的电绝缘材料,同时光信号在光纤中传输时发生全反射,不产生信号泄漏,所以不存在电气危害、电磁干扰、保密性差等问题。因此,光纤是迄今为止最好、最理想的信号传输媒质。

从以上几个主要方面可以看出,电缆只能用于码速率低于100 Mbit/s、带宽在几十kHz至几十MHz的低速局域网中,而光缆可以在码速率高于100 Mbit/s、甚至可高达100 Gbit/s的高速城域网(MAN)和广域网(WAN)中作为传输信道。

2. 光纤通信网络的优点

(1) 巨大的传输容量

目前,光纤通信系统中使用的频率为 $10^{14} \sim 10^{15}$ Hz数量级,其传输容量比常用的微波



通信系统容量高出 $10^4 \sim 10^5$ 倍, 一根光纤的潜在带宽可达 20 THz。采用这样的带宽, 只需一秒钟左右的时间, 即可将人类古今中外全部文字资料传送完毕。因此, 系统的带宽极宽, 容量巨大, 目前 400 Gbit/s 系统已经投入商业使用。

(2) 极低的传输衰耗

目前, 单模光纤在 1310 nm 窗口的衰耗在 0.35 dB/km 以下, 在 1550 nm 窗口的衰耗低至 0.2 dB/km。而同轴电缆对 60 MHz 的信号衰耗约为 19 dB/km, 市话电缆对 4 MHz 的信号衰耗为 20 dB/km, 所以光缆比电缆传输的中继距离长得多, 无中继传输距离可达几十、甚至上百公里。

(3) 抗电磁干扰能力强

光纤是由电绝缘材料制成的, 不怕外光、电磁、雷击、辐射等干扰, 因此, 光纤通信广泛用于电力通信、电气化铁路的信号传输, 雷击多发地区的通信, 核试验区的信号传输等, 信号传输质量极佳。

(4) 信道串扰小、保密性好

这是由光纤的结构决定的, 因为光信号在光纤中传输是利用全反射的原理, 所以信号一般很少向外泄露, 更不容易被窃听。

(5) 光缆尺寸小、重量轻

光纤的外直径只有 125 μm (比头发丝还细), 套有外套制成 24 ~ 48 芯光缆后, 外径约为 18 mm, 光缆比同样传输能力的电缆重量轻得多, 只有电缆的 1/10 ~ 1/20。光纤不会锈蚀、不怕高温、光纤接头不会产生电火花放电, 因此, 光纤通信系统更便于施工和维护, 便于敷设和运输。

(6) 原材料来源丰富、节约能源

制造光纤的主要原材料是高纯度的 SiO_2 , 它是地球上蕴藏量最为丰富的物质, 并且价格低廉。制造 10000 km 的光纤比制造同样长度的单管同轴铜线节约能源 2.64×10^{11} J (焦耳)。环境保护好, 有利于节约有色金属铜。

(7) 经济效益好

由于光纤具有通信容量大、中继距离长、节约有色金属、敷设方便、光缆传输环境适应性强、寿命长等优点, 所以经济效益特别明显, 34 Gbit/s 以上的光纤通信系统, 其价格比同轴电缆便宜 30% 以上。

【例 1-2】 设每路话音信号的带宽为 4 kHz, 假设系统带宽是载波的 1%, 请问载波波长为 1.55 μm 的光波, 能运载多少路话音信号?

解: 波长 $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$, 频率 $f_0 = c/\lambda = (3 \times 10^8 \text{ m/s})/1.55 \mu\text{m} \approx 1.94 \times 10^{14}$ Hz, 而系统带宽为载波的 1%, 即 $B = 1\% f_0 = 1.94 \times 10^{12}$ Hz, 每路话音信号的带宽 $B_1 = 4 \text{ kHz} = 4 \times 10^3$ Hz, 能运载的话音信道数 $N = B/B_1 = 1.94 \times 10^{12}/(4 \times 10^3) \approx 5 \times 10^8$ 路。

【例 1-3】 假定全球共有 10^{10} 个家庭, 每个家庭有一部电话, 如果采用频分复用 (FDM) 技术, 在一条线路上同时发送这些电话信号, 请问要求的最小带宽是多少? 一个 1.31 μm 的光波可以携带这个复用的信号吗?

解: (1) 因每路话音信号的带宽为 4 kHz, 10^{10} 部电话信号采用 FDM 技术后, 所占最小总带宽 $B = 10^{10} \times 4 \times 10^3 \text{ Hz} = 4 \times 10^{13} \text{ Hz}$ 。