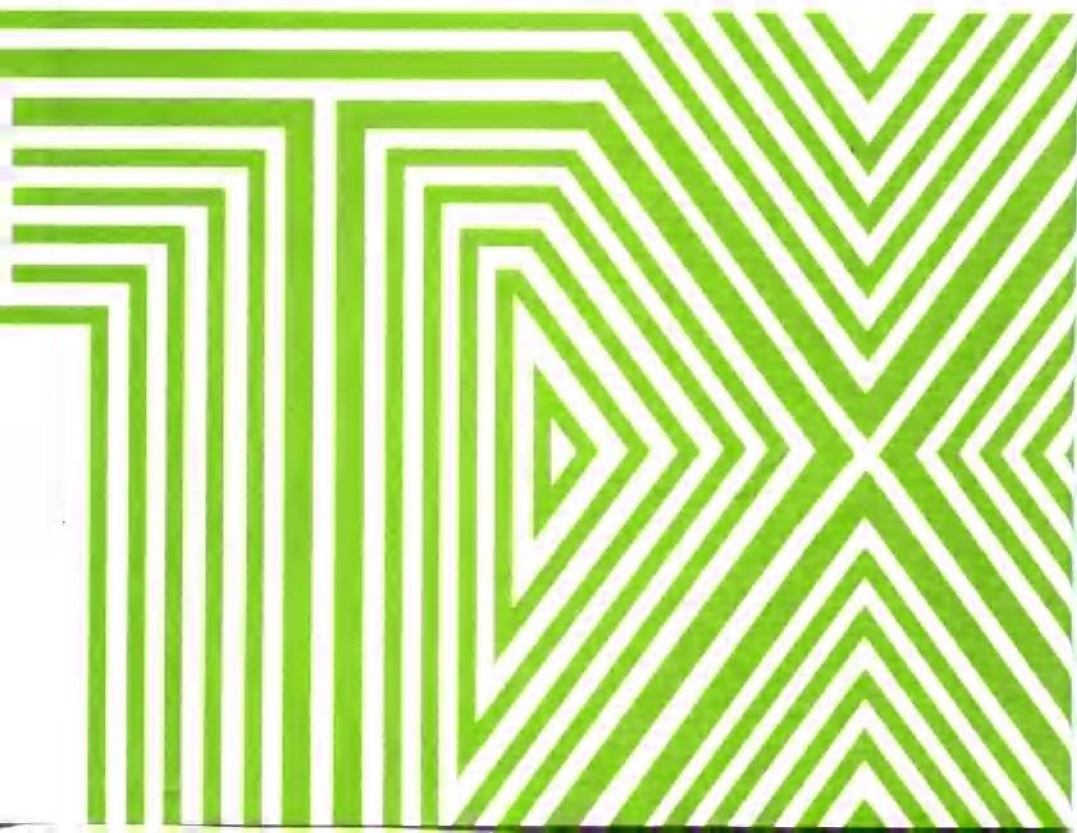


通信工程丛书

光缆及工程应用

胡先志 邹林森 刘有信 等编著
中国通信学会主编 人民邮电出版社



通信工程丛书

光缆及工程应用

胡先志 邹林森 刘有信 等编著

7-5117-1

中国通信学会主编·人民邮电出版社

图书在版编目(CIP)数据

光缆及工程应用/胡光志等编著. - 北京:人民邮电出版社,
1998.11

(通信工程丛书/中国通信学会主编)

ISBN 7-115-07350-3

I. 光… II. 胡… III. 光缆通信 IV. TN929.11

中国版本图书馆 CIP 数据核字(98)第 27911 号

通信工程丛书

光缆及工程应用

◆ 编 著 胡先志 邹林森 刘有信 等
责任编辑 王晓明

◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市崇文区夕照寺街 14 号
北京鸿佳印刷厂印刷
新华书店总店北京发行所经销

◆ 开本:850×1168 1/32

印张:9.5

字数:246 千字

1998 年 11 月第 1 版

印数:5 001 - 9 000 册

1999 年 8 月北京第 2 次印刷

ISBN 7-115-07350-3/TN·1409

定价:22.00 元

丛 书 前 言

为了帮助我国通信工程技术人员有系统地掌握有关专业的基础理论知识,提高解决专业科技问题、做好实际工作的能力,了解通信技术的新知识和发展趋势,以便为加快我国通信建设、实现通信现代化作出应有的贡献,我会与人民邮电出版社协作,组织编写这套“通信工程丛书”,陆续出版。

这套丛书的主要读者对象是工作不久的大专院校通信学科各专业毕业生、各通信部门的助理工程师、工程师和其他通信工程技术人员。希望能够有助于他们较快地实际达到通信各专业工程师所应有的理论水平和技术水平。

这套丛书的特点是力求具有理论性、实用性、系统性和方向性。丛书内容从我国实际出发,密切结合当前通信科技工作和未来发展的需要,阐述通信各专业工程师应当掌握的专业知识,包括有关的系统、体制、技术标准、规格、指标、要求,以及技术更新等方面。力求做到资料比较丰富完备,深浅适宜,条理清楚,对专业技术发展有一定的预见性。这套丛书不同于高深专著或一般教材,不仅介绍有关的物理概念和基本原理,而且着重于引导读者把这些概念和原理应用于实际;论证简明扼要,避免繁琐的数学推导。

对于支持编辑出版这套丛书的各个通信部门和专家们,我们表示衷心感谢。殷切希望广大读者和各有关方面提出宝贵的意见和建议,使这套丛书日臻完善。

中国通信学会

序 言

由武汉邮电科学研究院胡先志、邹林森、刘有信、刘水华、张燕华、胡战洪、唐宜伟等研究人员共同编著的《光缆及工程应用》一书总结了当今光纤通信中光纤光缆材料、制造、性能测试、无源光器件、工程设计等方面的最新研究成果。特别是老、中、青三代作者结合他们多年来从事的研究、设计及生产方面的具体工作经验,在书中给出了大量的图表、简明的计算结果和设计实例,使该书颇具实用价值。

本人高兴地获悉此书即将由人民邮电出版社出版。我相信这本实用性专著将会对我国的光纤通信的发展起到积极推动作用。

在深为本书的作者和人民邮电出版社乐于为我国光纤通信事业奉献精神感动的同时,本着让更多从事光纤通信工作的同仁们参阅方便并且能充分利用这本专著的愿望,我乐于举荐并为之作序。

中国工程院院士

赵梓森

1998年1月10日

前 言

目前,光纤通信正在向着大容量、高速率、远距离方向迅猛发展,随着国际互联网等信息技术的广泛普及应用,光纤用户也开始出现并不断增加,面对这种形势,作者编写了本书,旨在让更多的从事光纤通信工作的技术人员和管理人员能够了解当前光纤光缆技术的发展动态与最新研究成果。

在本书的编写中,作者注重将基本原理和实际应用有机地结合起来,并且特别注意以清晰直观的图表形式来帮助读者抓住技术关键并全面理解本书内容。

全书所包括的内容为:光纤的光传输基本原理、光纤光缆材料、设计、制备和测试方法,无源光器件、光缆线路设计、施工和维护。

参加本书编写工作的有:胡先志(第一、二、三、七章)、刘有信(第四章)、胡战洪(第五章)、邹林森(第六章)、刘水华(第八章)、唐宜伟(第九章)、张燕华(第十章),全书最后由胡先志统一修改定稿。

在本书的编写出版过程中,得到了武汉邮电科学研究院谢德平、王莉、钱峰、曹美娥等同志的大力支持和热心帮助,在此向他们表示诚挚的敬意和由衷的感谢。

由于本书涉及光纤通信内容广泛且新颖,加之我们专业水平有限和编写时间仓促,书中难免出现一些谬误和不足,恳请读者予以指正。

作者

1998年1月10日于武汉

目 录

第一章 概论	1
第二章 光纤传输基本原理	7
2.1 电磁波谱	7
2.2 光传播的基本概念	8
2.3 光纤的光传输基本原理	11
第三章 光纤	16
3.1 光纤的传输特性	16
3.1.1 衰减	16
3.1.2 色散	19
3.1.3 偏振模色散	22
3.1.4 光纤的非线性效应	23
3.2 光纤折射率分布	26
3.2.1 基本原理	26
3.2.2 设计原则	29
3.2.3 剖面类型	30
3.3 光纤制备	33
3.3.1 材料选择	33
3.3.2 制备方法	36
3.4 光纤类型	50
3.4.1 多模光纤	50
3.4.2 单模光纤	52
3.4.3 塑料光纤	59
3.5 光纤的选用原则和推荐方案	60
3.5.1 选用原则	60

第八章 光无源器件	191
8.1 光纤光缆连接器	191
8.1.1 分类	191
8.1.2 工程中常用的几种光纤光缆连接器	194
8.2 光功率分支器	199
8.2.1 分类	199
8.2.2 熔锥技术	199
8.2.3 光分支器主要性能指标	200
8.3 光波分复用器	206
8.3.1 工作原理	206
8.3.2 波分复用器主要光学特性	207
8.3.3 工程中常用的几种波分复用器件	208
8.3.4 光波分复用技术应用	217
8.4 光隔离器	223
8.5 掺铒光纤放大器	229
8.5.1 工作原理	230
8.5.2 EDFA 基本结构	231
8.5.3 EDFA 主要性能指标	234
8.6 光电器件及光器件发展趋势	238
第九章 光缆线路工程设计	239
9.1 工程设计的原则和内容	239
9.1.1 基本原则	239
9.1.2 设计程序	239
9.1.3 设计内容	239
9.2 线路设计	240
9.2.1 路由选择	240
9.2.2 敷设方式	241
9.3 传输设计	248
9.3.1 衰减受限系统	249

6.4 特种光缆	157
6.4.1 水底光缆	158
6.4.2 光/电混合缆	160
6.4.3 无卤阻燃光缆	161
6.4.4 非金属光缆	161
6.4.5 复合地线光缆	163
6.5 发展趋势	164
6.5.1 带状光纤缆	165
6.5.2 室内布线光缆	173
6.5.3 研究重点与发展趋势	175
第七章 光缆性能及测试	177
7.1 概述	177
7.2 机械性能	177
7.2.1 拉伸	178
7.2.2 磨损	178
7.2.3 压扁	180
7.2.4 冲击	182
7.2.5 反复弯曲	183
7.2.6 扭转	183
7.2.7 曲挠	184
7.2.8 钩挂	184
7.2.9 弯折	185
7.2.10 猎枪击伤	186
7.3 环境性能	186
7.3.1 温度循环	187
7.3.2 护套完整性	187
7.3.3 渗水	189
7.3.4 滴流	189
7.3.5 阻燃	190

10.5.3 内容	288
参考文献	289

9.3.2	色散受限系统	249
9.3.3	设计举例	250
9.4	光缆选型	251
9.4.1	光缆结构的选择	251
9.4.2	光纤类型选用	252
9.5	工程设计格式	253
9.5.1	初步设计	253
9.5.2	施工图设计	254
9.5.3	光缆通信建设工程概、预算的编制	255
9.5.4	图纸	261
第十章	光缆线路施工与维护	270
10.1	概述	270
10.2	光缆敷设	270
10.2.1	管道敷设	270
10.2.2	架空敷设	273
10.2.3	直埋敷设	276
10.2.4	光缆水底敷设	277
10.2.5	局内敷设	280
10.3	光缆接续与安装	281
10.3.1	光纤的连接	281
10.3.2	光缆接续与安装	283
10.4	光缆线路的测量	284
10.4.1	光缆单盘检验	284
10.4.2	光纤连接损耗测量	286
10.4.3	光缆链路中继段测量	287
10.5	光缆线路维护	288
10.5.1	任务	288
10.5.2	分工	288

第一章 概 论

1. 光纤通信简史

光纤通信是以激光作为信息载体,以光纤作为传输媒介的通信方式。由于光纤的传光性能优异,传输带宽极大,因此,在当今的通信方式中已形成了一个以光纤通信为主,微波、卫星通信为辅的格局。

光纤通信技术是近 30 年迅猛发展起来的高新技术。它的诞生和发展,给世界通信技术带来了划时代的革命。为了使读者对光纤通信的发展历程有个基本了解,现将该技术的进程简要介绍如下。

1966 年,美籍华人高锟和 George. A. Hockham 根据介质波导理论共同提出光纤通信的概念。

1970 年,美国康宁公司的 Maurer 等人首次研制出阶跃折射率多模光纤,其在波长为 630nm 处的衰减系数小于 20dB/km;同年美国贝尔实验室的 Hayashi 等人研制出室温下连续工作的 GaAlAs 双异质结注入式激光器。正是光纤和激光器这两个科研成果的同时问世,拉开了光纤通信的序幕。

1972 年,随着光纤制备工艺中的原材料提纯、制棒和拉丝技术水平的不断提高,进而将梯度折射率多模光纤的衰减系数降至 4dB/km。

1976 年,在进一步设法降低玻璃中的 OH 含量时发现光纤的衰减在长波长区有:1.31 μ m 和 1.55 μ m 两个窗口。

1980 年,原料提纯和光纤制备工艺得到不断完善,从而加快了光纤的传输窗口由 0.85 μ m 移至 1.31 μ m、1.55 μ m 的进程。特别是制出了低衰减光纤,其在 1.55 μ m 的衰减系数为 0.20dB/km 已接近理

论值。与此同时,为促进光纤通信系统的实用化,人们又及时地开发出适用于长波长的光源:激光器、发光管、光检测器。应运而生的光纤成缆、光无源器件和性能测试及工程应用仪表等技术的日趋成熟,都为光纤光缆作为新的通信传输媒介奠定了良好的基础。

1976年,美国西屋电气公司在亚特兰大成功地进行了世界上第一个 44.736Mbit/s 传输 110km 的光纤通信系统的现场试验,使光纤通信向实用化迈出第一步。

1981年以后,世界各发达国家才将光纤通信技术大规模地推入商用。历经近 20 年的突飞猛进的发展,光纤通信速率已由 1978 年的 45Mbit/s 提高到目前的 40Gbit/s。

我国自 70 年代初就已开始了光纤通信技术的研究,1977 年,武汉邮电科学研究院研制出中国的第一根阶跃折射率分布多模光纤,其在 $0.85\mu\text{m}$ 的衰减系数为 300dB/km。

1979 年,建立了第一个用多模短波长光纤进行的 8.0Mbit/s、5.7km 室内通信试验系统。

1987 年底,建成第一个国产的长途光通信系统,由武汉至荆州,全长约 250km,传输 34Mbit/s 信号。

1988 年起,国内光纤通信系统的应用已由多模光纤转为单模光纤。

1991 年,完成了第一条全国产化 140Mbit/s 的合肥至芜湖长途直埋单模光纤光缆线路,全长 150km 左右,光缆首次从水下跨越长江。

1993 年,建立全国产化上海至无锡的大容量 565Mbit/s 的高速系统。

1997 年,武汉邮电科学研究院将自行研制出的 622Mbit/s 和 2.5Gbit/s 光纤通信系统分别安装到湖北的咸宁至通城,海南的海口至三亚进行现场试验。

目前,武汉邮电科学研究院的 STM-64 及与北京大学合作的 $8 \times 2.5\text{Gbit/s}$ 项目,清华大学、北方交通大学、天津大学、北京邮电大

学等院校的光孤子、光时分复用等研究项目都正在加速进行之中。

现在,我国光纤通信产业已初具规模,已能生产光纤光缆、光电器件、光端机及其他工程应用的配套仪表器件等。由此可见,中国已具有大力发展光纤通信的综合实力。

2. 光纤通信的特点

与电缆或微波等电通信方式相比,光纤通信的优缺点如下:

(1) 优点:

- ① 传输频带极宽,通信容量很大。
- ② 传输衰减小,距离远。
- ③ 信号串扰小,传输质量高。
- ④ 抗电磁干扰,保密性好。
- ⑤ 光纤尺寸小,重量轻,便于运输和敷设。
- ⑥ 耐化学侵蚀,适用于特殊环境。
- ⑦ 原料资源丰富。
- ⑧ 节约有色金属。

(2) 缺点:

- ① 光纤弯曲半径不宜过小。
- ② 光纤的切断和连接操作技术要求十分娴熟。
- ③ 分路、耦合操作繁琐。

应该指出,光纤通信的缺点,都已不同程度上得以克服,它们不影响光纤通信的实用。下面的表 1.1 和表 1.2 分别列出了光纤与几种电通信传输介质的特性比较及光纤通信应用场所。

表 1.1 光纤与其他几种电通信传输介质的特性比较

传输介质	带 宽 (MHz)	衰减系数 (dB/km)	中继距离 (km)	敷设安装	接 续
对称电缆	6	20(4MHz)	1 ~ 2	方便	方便
同轴电缆	400	19(60MHz)	1.6	方便	较方便

续表

传输介质	带 宽 (MHz)	衰减系数 (dB/km)	中继距离 (km)	敷设安装	接 续
微波波导	40 ~ 120(MHz)	2	10	特殊	特殊
光纤光缆	> 10GHz.km	0.2 ~ 3	> 50	方便	特殊

表 1.2 光纤的特点及其应用场合

光纤特点	应用场合
低衰减、宽频带	公用通信,有线电视图像传输
尺寸小、重量轻	公用通信,计算机,飞机,导弹,舰内通信控制
抗电磁干扰	电力及铁道通信,交通控制信号,核电站通信
耐化学侵蚀	油田、炼油厂、矿井等区域的通信

3. 光纤通信系统

光纤通信系统是由发送设备、传输线路、接收设备三大部分构成,如图 1.1 所示。

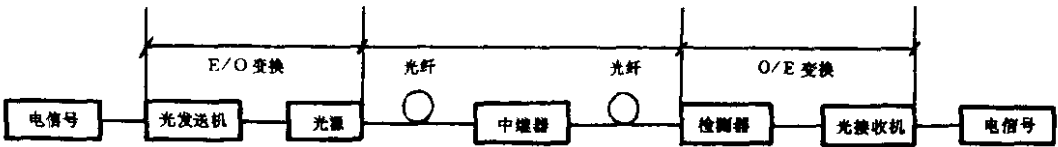


图 1.1 光纤通信系统框图

就广义而言,通信是各种形式信息的转移或传递。通常的具体做法为,将拟传递的信息设法加载(或调制)到某种载体上。被调制的载体传送到目的地后,还需将信息从载体上解脱(解调)出来。光纤通信系统中电端机的作用是对来自信息源的信号进行处理,例如,模拟/数字转换多路复用等。发送端光端机的作用则是将光源(如激光器或发光二极管)通过电信号调制成光信号,输入于光纤传输至远方。接收端的光端机内有光检测器(如光电二极管)将来自光纤的光

信号还原成电信号,经放大、整形、再生恢复原形后,输至电端机的接收端。对于长距离的光纤通信系统,还需要中继器,其作用是将经过长距离光纤衰减和畸变后的微弱光信号放大、整形、再生成一定强度的光信号,继续送向前方,以保证良好的通信质量。目前的中继器都采用光-电-光形式,即将接收到的光信号,用光电检测器变换为电信号,经放大、整形、再生后再调制光源,将电信号变换成光信号重新发出,而不是直接放大光信号。近年来,适合作光中继器的光放大器(如:掺铒光纤放大器)已研制成功,这就使得采用光纤放大器的全光中继及全光网络将会变得为期不远。

4. 光纤通信发展趋势

光纤通信技术的问世与发展给世界电信业带来革命性的变换。特别是经历近 30 年的研究开发,光纤、光缆、器件、系统的品种更新和性能完善,现已使光纤通信成为信息高速公路的传输平台。当今光纤通信技术的主要发展趋势有如下这些:

(1) 系统高速化、网络化

随着信息社会的到来,信息共享、有线电视、电视点播、电视会议、家庭办公、计算机互联网等应运而生,迫使光纤通信向高速化、大容量、网络化方向发展。实现高速化,大容量的主要手段是采用时分复用,波分复用和频分复用。现代电信网的发展对光纤通信提出更高的要求,即光纤通信已由以往的点到点的 PDH 系统,转入 SDH 传送网和光纤接入网。

SDH 网络是一个将复接、线路传输及交换功能融为一体,并由统一网管系统进行自动化管理的综合信息网。它的出现使光纤通信告别了点对点传输而进入智能化应用的传送网阶段。

光纤接入网作为电信网的一部分,直接面向用户。通过将光纤引入千家万户,保证亿万用户的多媒体信息畅通无阻地进入信息高速公路。

(2) 光纤的长波长化

由于光纤传输速率的高速化、大容量化(例如:美国 MCI 于 1991

年开通了 Chicago 至 St. Louis 全长 275 英里的 $4 \times 10\text{Gbit/s}$ 的商用系统等)出现的光纤衰减、色散、非线性现象严重影响到光纤系统的质量,因而,人们将光纤的工作波长由 $0.85\mu\text{m}$ 向 $1.31\mu\text{m}$ 至 $1.55\mu\text{m}$ 的长波长方向发展。为降低衰减、色散和克服非线性现象,进而研制出了常规单模光纤(ITU-T G.652),现为广泛应用的光纤,它在 $1.31\mu\text{m}$ 的零色散为零, $1.55\mu\text{m}$ 最低损耗,其工作波长为 $1.31\mu\text{m}$ 。色散位移单模光纤(ITU-T G.653)低损耗和零色散均在 $1.55\mu\text{m}$,工作波长为 $1.55\mu\text{m}$ 。非零色散位移单模光纤(ITU-T G.655),其在 $1.55\mu\text{m}$ 损耗小,色散小,非线性效应小。

(3) 光缆纤芯的高密化

随着通信的发展,用户对通信的要求,即从窄带电话、传真、数据和图像业务逐渐转向可视电话、电视点播、图文检索和高速数据等宽带新业务。由此而诞生了光纤用户网。光纤用户网的主要传输媒介是光纤。但用户光缆的特点是含纤数量,可高达 $2000 \sim 4000$ 芯,这种高密化的带状光缆可减少光缆的直径和重量,又可在工程施工中便于分支和提高接续速度。

(4) 器件的集成化

优异的光器件是构成先进的光纤通信系统的基础。当今器件的发展趋势是高速率、优性能、多用途、组件化和单片化。