



# 光 纤 通 信 原 理 与 系 统

(第3版)

GUANGXIAN TONGXIN YUANLI YU XITONG

.11

○ 张明德 孙小菡  
○ 东南大学出版社

# 光纤通信原理与系统

(第3版)

张明德 孙小菡

东南大学出版社

## 内 容 提 要

本书系统介绍光纤通信的基本原理与系统技术。主要内容有:光纤传输原理与特性,包括非线性特性及光纤光栅、光子晶体光纤等;光源与光发送机,重点介绍半导体激光器的原理与应用特性;光检测器与光接收机,重点介绍数字接收机的特性分析;光放大器原理与应用,重点是掺铒光纤放大器及光纤喇曼放大器的原理与应用;光纤通信系统与网络,包括数字与模拟光纤通信系统、光纤通信网络等。每章末均有习题。本书还以较大篇幅介绍了代表当今高速大容量光纤通信技术主流的波分复用光纤通信技术,以及代表未来光纤通信技术发展方向的全光光纤通信技术。

本书既可作为高等院校工科电子通信类及理科物理类本科生及研究生的教材,也适合从事光纤通信工作的科技人员参考。

## 图书在版编目(CIP)数据

光纤通信原理与系统 / 张明德, 孙小菡编. —3 版. 南京: 东南大学出版社, 2003.9  
ISBN 7-81089-336-X

I. 光... II. ①张... ②孙... III. ①光纤通信-基本知识 ②光导纤维通信系统 IV. TN929.11

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2003) 第 066558 号

东南大学出版社出版发行  
(南京四牌楼 2 号 邮编 210096)

出版人: 宋增民

江苏省新华书店经销 南京邮电学院印刷厂印刷

开本: 787 mm × 1092 mm 1/16 印张: 18.5 字数: 462 千字

2003 年 9 月第 3 版 2003 年 9 月第 6 次印刷

印数: 12001—15000 定价: 26 元

(凡因印装质量问题,可直接向发行科调换。电话: 025-3795801)

## 第 3 版 前 言

本书第 3 版对第 2 版的内容进行了全面的删节修订,根据光纤通信技术的发展,增加了部分内容,如平面光波导、光子晶体光纤及色散补偿技术等。同时,在第 3 版中还增加了习题,供教学时选用。

为了支持制作多媒体课件的需要及教师教学的方便,第 3 版还为任课教师准备了一张教学支持光盘,任课教师可凭本书最后的证明直接向出版社索取。

尽管尽了最大努力,但由于作者学识有限,书中仍难免有不足与错误之处,敬请不吝指正。

作 者  
2003 年 6 月

## 第 2 版 前 言

本书第 1 版自 1996 年 12 月出版以来,每年重印,以满足许多院校每年教学用书及科技工作者参考的需要。但由于光纤通信技术的飞速发展,近几年来涌现出了许多新技术,光纤通信发展到了一个新的阶段。虽然原书讲述的原理仍是学习光纤通信技术的基础,但也显得已难以适应光纤通信发展的形势,这就是本书再版修订的原因。在第 2 版中增加了一些对当今光纤通信发展有重要影响的内容,主要有:

- (1) 单模光纤中的非线性效应;
- (2) 光纤光栅;
- (3) 光放大器;
- (4) 波分复用光纤通信系统;
- (5) 光纤通信网络;
- (6) 全光通信技术。

由于这些内容本身十分丰富,而篇幅又有限,因此对某些内容的阐述仍未能深入展开。尽管如此,本书的篇幅比第 1 版时仍有了较大的增加。由于第 1 版的内容已是非常基础,难以做大的删节,增加内容的同时稍增加篇幅也是不得已而为之,请读者见谅。

硕士研究生万骏俊及周亚凌为本书的图稿作了大量工作,特致谢意。

书中不妥及错误之处,恳请不吝指正。

作 者  
2001 年 3 月

## 前 言

光纤通信在现代信息科学技术中的举足轻重地位已是有口皆碑,它的出现与迅速发展大大地改观了信息技术的面貌。当今世界上光纤通信得到了广泛的应用,不仅陆地上使用,而且还铺设了许多跨越大洋大海的海底光缆。可以毫不夸张地说,光缆现在已经包裹了整个地球。光纤通信已成为现代通信的支柱、世界通信网的骨干。用光缆代替传统使用的电缆,使电信网光纤化已是大势所趋。虽然一般地讲光纤通信技术已经成熟,但其发展势头方兴未艾,各种新技术、新产品、新构思仍雨后春笋般地涌现,推动着光纤通信技术的进一步发展。“信息高速公路”铺设到各个家庭已不是遥远的事,必将更深刻地影响到人们的生活方式、工作方式与学习方式,并推动人类社会的文明进步与发展。

目前,国内外许多高校,无论是工科还是理科,纷纷开设了光纤通信的有关课程,以满足社会对各种层次人才的需求。本书旨在希望用不太大的篇幅,在详细阐明光纤通信技术基本原理的同时,尽可能结合光纤通信系统与设计的实际,以及光纤通信的新技术、新发展,以满足高年级本科生及低年级研究生学习光纤通信原理与系统的需要,同时亦可供从事光纤通信技术工作的科研与工程技术人员参考。

读者只要具有电磁场理论、大学物理及高等数学的基本知识,就可阅读本书。如读者学习过光电子学及通信原理的基本知识当然更好,但这并不是阅读本书的前提。全书共分5章,主要围绕应用最广的强度调制、直接检测光纤通信系统展开讨论。第一章光纤通信概论,介绍光纤通信的特点、历史、系统结构组成与发展。接着三章介绍光纤通信系统的核心部分,其中第二章介绍光纤传输原理与特性;第三章介绍光源与光发送机,包括半导体光源的基本工作原理、应用特性、驱动电路与调制技术;第四章介绍光检测器与光接收机,包括半导体光检测器的光检测原理及主要特性,然后着重对光接收机的性能特性进行系统分析。第五章为光纤通信系统。首先对光纤通信系统的元件选择、设计原则与方法进行综合讨论,接着对模拟光纤通信系统及数字光纤通信系统的组成与性能作详细介绍,然后对更复杂的光纤通信系统如相干光纤通信、波分复用、光纤网等进行讨论,最后对光纤通信新技术如光放大器与全光通信、光纤孤子通信等进行介绍。

本书是在作者讲授光纤通信原理与系统课程的基础上编写而成的。在课程讲授过程中吸收了多届学生的建议,书稿编写过程中承蒙徐淦卿教授审阅,并提出了许多宝贵的修改意见,在此向他们表示深切的谢意。由于水平有限,对书中的不足及错误之处,祈请专家学者与读者不吝赐教批评指正。

作 者

1996年3月

# 目 录

<b>1 光纤通信概论</b> .....	( 1 )
1.1 光纤通信的发展史 .....	( 1 )
1.2 光纤通信系统 .....	( 3 )
<b>2 光纤</b> .....	( 6 )
2.1 概述 .....	( 6 )
2.2 光线在光纤中的传输 .....	( 9 )
2.2.1 阶跃光纤中的光线分析 .....	( 9 )
2.2.2 梯度光纤中的光线分析 .....	( 10 )
2.2.3 平面光波导 .....	( 13 )
2.3 光纤的波动理论 .....	( 17 )
2.3.1 波动方程 .....	( 17 )
2.3.2 归一化变量 .....	( 18 )
2.3.3 贝塞尔方程的场解 .....	( 19 )
2.3.4 特征方程 .....	( 21 )
2.3.5 线偏振模及其特性 .....	( 22 )
2.3.6 传播常数 $\beta$ 与归一化频率 $V$ 的关系 .....	( 24 )
2.3.7 光纤中的功率流 .....	( 25 )
2.3.8 单模光纤 .....	( 26 )
2.4 光纤的损耗特性 .....	( 29 )
2.4.1 材料的吸收损耗 .....	( 30 )
2.4.2 光纤的散射损耗 .....	( 31 )
2.4.3 辐射损耗 .....	( 31 )
2.5 光纤的色散特性及带宽 .....	( 32 )
2.5.1 群时延和时延差 .....	( 33 )
2.5.2 材料色散和波导色散 .....	( 33 )
2.5.3 高斯脉冲在单模光纤中的传播 .....	( 38 )
2.5.4 偏振模色散 .....	( 40 )
2.5.5 模间色散 .....	( 41 )
2.5.6 光纤的传输带宽 .....	( 41 )
2.6 单模光纤中的非线性效应 .....	( 43 )
2.6.1 媒质中的非线性效应 .....	( 43 )
2.6.2 光纤中的受激散射效应 .....	( 44 )
2.6.3 非线性折射率调制效应 .....	( 46 )
2.6.4 光脉冲在光纤中的传输方程 .....	( 47 )

2.7	光纤光栅	( 48 )
2.7.1	基本工作原理	( 48 )
2.7.2	耦合模理论及布拉格光栅的滤波特性	( 50 )
2.7.3	啁啾光纤光栅	( 53 )
2.7.4	长周期光纤光栅	( 54 )
2.7.5	抽样光栅	( 55 )
2.7.6	光纤光栅在光纤通信中的应用	( 55 )
2.8	无源光器件	( 57 )
2.8.1	光纤的连接与光纤连接器	( 58 )
2.8.2	光纤分路器及耦合器	( 58 )
2.8.3	GRIN 透镜连接器	( 60 )
2.8.4	光隔离器与光环行器	( 60 )
2.8.5	光开关	( 61 )
2.9	聚合物光纤与光子晶体光纤简介	( 64 )
2.9.1	聚合物光纤	( 64 )
2.9.2	光子晶体光纤	( 65 )
	习 题	( 68 )
<b>3</b>	<b>光源与光发送机</b>	<b>( 70 )</b>
3.1	半导体中的光发射	( 71 )
3.1.1	光的吸收与发射	( 71 )
3.1.2	半导体的光发射	( 74 )
3.2	发光二极管	( 78 )
3.2.1	发光二极管的结构	( 78 )
3.2.2	发光二极管的主要特性	( 80 )
3.3	半导体激光器的工作原理与结构	( 83 )
3.3.1	半导体激光器的工作原理	( 83 )
3.3.2	半导体激光器的结构	( 87 )
3.4	半导体激光器的工作特性	( 93 )
3.4.1	$P-I$ 特性	( 93 )
3.4.2	模式特性与线宽	( 96 )
3.4.3	调制特性	( 97 )
3.4.4	波长调谐特性	( 102 )
3.4.5	噪声特性	( 103 )
3.4.6	半导体激光器的安全使用	( 105 )
3.5	光发送机	( 105 )
3.5.1	光载波的调制	( 106 )
3.5.2	发光二极管驱动电路	( 106 )
3.5.3	激光二极管驱动电路	( 108 )
3.6	光源与光纤的耦合	( 110 )

3.7 光源的外调制技术	(112)
习 题	(114)
<b>4 光检测器与光接收机</b>	<b>(116)</b>
4.1 概述	(116)
4.2 光检测器	(117)
4.2.1 光检测器的工作原理	(117)
4.2.2 光检测器的主要工作特性	(122)
4.3 光接收机的噪声	(125)
4.3.1 光接收机中的噪声源	(125)
4.3.2 接收机等效电路及放大器电路噪声	(127)
4.3.3 光检测器的噪声	(128)
4.3.4 背景噪声	(131)
4.4 模拟接收机的噪声及信噪比	(132)
4.4.1 均方信号电流	(132)
4.4.2 光检测器噪声	(132)
4.4.3 信噪比及接收灵敏度	(133)
4.5 数字接收机的噪声分析	(135)
4.5.1 概述	(135)
4.5.2 数字接收机的分析模型	(136)
4.5.3 信号分析	(137)
4.5.4 放大器电路噪声	(138)
4.5.5 光检测器噪声	(138)
4.5.6 输入输出脉冲形状及 $I_1$ 、 $I_2$ 、 $I_3$ 、 $\Sigma_1$ 值	(140)
4.6 光接收机前置放大器	(145)
4.6.1 高阻抗前置放大器	(146)
4.6.2 互阻抗放大器	(152)
4.6.3 动态范围	(154)
4.7 数字接收机的误码率和接收灵敏度	(156)
4.7.1 数字接收机的误码率	(156)
4.7.2 数字接收机的接收灵敏度	(159)
4.7.3 数字接收机的灵敏度极限——量子极限	(163)
4.8 数字接收机中的定时提取与判决再生	(164)
4.8.1 定时提取	(164)
4.8.2 判决再生	(165)
习 题	(166)
<b>5 光放大器</b>	<b>(168)</b>
5.1 光放大器简介及其一般特性	(168)
5.1.1 半导体光放大器(SOA)	(168)



5.1.2	掺铒光纤放大器(EDFA)	(170)
5.1.3	光纤喇曼放大器(FRA)	(170)
5.1.4	光放大器一般工作特性	(170)
5.1.5	光放大器在光纤通信系统中的应用	(174)
5.2	半导体光放大器	(176)
5.2.1	增益和带宽	(176)
5.2.2	功率饱和及多信道放大特性	(177)
5.2.3	半导体光放大器的应用	(178)
5.3	掺铒光纤放大器	(178)
5.3.1	基本工作原理	(178)
5.3.2	增益特性	(181)
5.3.3	噪声特性	(183)
5.3.4	多信道放大特性及宽带 EDFA	(185)
5.3.5	EDFA 的应用	(188)
5.4	光纤喇曼放大器	(190)
	习 题	(193)
<b>6</b>	<b>光纤通信系统与网络</b>	<b>(195)</b>
6.1	数字光纤通信系统	(195)
6.1.1	光纤传输系统最适合于传输数字信号	(195)
6.1.2	数字光纤通信系统的体制	(196)
6.1.3	数字光纤通信系统的基本结构	(199)
6.1.4	线路码型	(201)
6.1.5	SDH 同步传输网	(204)
6.1.6	数字光纤通信系统的性能	(207)
6.1.7	数字光纤通信系统的主要性能指标测试	(213)
6.2	系统设计考虑	(215)
6.2.1	工作波长的选择	(216)
6.2.2	元件的选择	(216)
6.2.3	损耗限制系统的计算——功率预算法	(217)
6.2.4	色散限制系统的计算——上升时间预算	(218)
6.3	模拟光纤通信系统	(220)
6.3.1	模拟调制技术	(221)
6.3.2	基带直接强度调制(D-IM)	(222)
6.3.3	脉冲频率调制(PFM-IM)电视信号传输	(223)
6.3.4	副载波复用强度调制(SCM-IM)	(224)
6.4	相干光纤通信系统	(230)
6.4.1	基本原理	(230)
6.4.2	调制与解调技术	(232)
6.4.3	相干光纤通信的优点及关键技术	(233)

6.4.4 相干光纤通信系统实例·····	(234)
6.5 光纤孤子通信·····	(234)
6.6 波分复用光纤通信系统·····	(237)
6.6.1 WDM 光纤通信系统结构·····	(238)
6.6.2 光滤波器·····	(240)
6.6.3 波分复用/解复用器·····	(241)
6.6.4 光源技术·····	(246)
6.6.5 光纤技术·····	(247)
6.6.6 色散补偿技术·····	(248)
6.6.7 WDM 系统现状·····	(252)
6.6.8 WDM 的发展·····	(254)
6.7 光纤通信网络·····	(256)
6.7.1 公用通信网简介·····	(256)
6.7.2 光纤局域网·····	(260)
6.7.3 光纤接入网·····	(266)
6.8 全光通信网·····	(269)
6.8.1 WDM 全光网的结构及波长路由·····	(270)
6.8.2 波长转换器·····	(272)
6.8.3 光交叉连接与光分插复用节点设备·····	(274)
6.8.4 IP over WDM 网技术·····	(277)
6.8.5 全光通信网概况·····	(278)
习 题·····	(280)
主要参考资料·····	(282)

# 1 光纤通信概论

人类为了生存和发展,在生产及社会活动中,常常需要把信息从一个地方传送到遥远的另一个地方,这种信息的传递称为通信。通信必须依靠通信系统来完成。任何一个通信系统均包括三个主要的组成部分,即发送、传输及接收,光纤通信也不例外。需传送的信息在发送端输入到发送机中,将信息叠加或调制到作为信息信号载体的载波上,然后将已调制的载波通过传输媒质传送到远处的接收端,由接收机解调出原来的信息。通常,信息的载波是射频波、微波或毫米波等,传输媒质为金属导线、同轴电缆、金属波导管或大气等。但近年来,以光波为载波、光纤作为传输媒质的光纤通信异军突起,发展十分迅速,已成为 IT 产业的支柱。

本章概述光纤通信的发展历史、光纤通信系统的组成特点等基本问题。

## 1.1 光纤通信的发展史

利用光进行通信并不是一个新概念,我国古代使用的烽火台就是大气光通信的最好例子。后来的手旗、灯光甚至交通红绿灯等均可划入光通信的范畴,但可惜它们所能传递的距离和信息量都是十分有限的。

近代光通信的雏形可追溯到 1880 年 Bell 发明的光电话,他用阳光作为光源、硒晶体作为光接收检测器件,通过 200 m 的大气空间成功地传送了语音信号。虽然在以后几十年中,人们对 Bell 的光电话具有浓厚的兴趣,但由于缺乏合适的光源及严重的大气衰减,这种大气通信光电话未能像其他电通信方式那样得到发展。

近代光通信的真正发展则只是近三四十年的事,其中起主导作用的是激光器和光纤的诞生。首先是 1960 年 Maiman 发明了红宝石激光器,激光器产生的强相干光为现代光通信提供了可靠的光源。这种单波长的激光具有普通无线电波一样的特性,可对其调制而携带信息。利用激光的早期光通信也是通过大气传输的。但很快发现,许多因素如雾、雨、云,甚至一队偶然飞过的鸟,都会干扰光波的传播,因而只能作短距离通信用。显然,需要一种像射频或微波通信的电缆或波导那样的光波通信传输线,以克服这些影响,实现信息的长距离稳定传输。

1965 年, E. Miller 报导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实用。而另一方面,光导纤维的研究正在扎实进行。早在 1951 年就发明了医疗用玻璃纤维,但这种早期的光导纤维损耗太大(大于 1000 dB/km),也不能作为光通信的传输媒质。1966 年, C. K. Kao 和 G. A. Hockman 发表了对光纤通信发展具有历史意义的著名论文。他们在分析了造成光纤传输损耗高的主要原因后指出,如能完全除去玻璃中的杂质,损耗就可降到 20 dB/km——相当于同轴电缆的水平,那么,光纤就可用来进行光通信。在这种预想的鼓舞下, Corning 公司终于在 1970 年制出了 20 dB/km 损耗的光纤,从而为光纤通信的发展铺平了道路。对光纤谱特性的研究发现,它有

3个低损耗的传输窗口,即850 nm的短波长窗口和1300 nm、1500 nm的长波长窗口。而后,随着新的制造方法的出现及工艺水平的不断提高,光纤损耗不断降低。到1979年,单模光纤在1550 nm波长的损耗已降到0.2 dB/km,接近石英光纤的理论损耗极限。

而且光波频率高,光纤的带宽资源亦十分可观,是任何其他传输媒质无法比拟的。可以这样说,光纤是通信工作者梦寐以求的理想传输媒质,有近乎完美的品质:

- 几乎是无限的带宽;
- 几乎是零的损耗;
- 几乎为零的信号失真;
- 几乎为零的功率消耗;
- 几乎为零的材料消耗;
- 几乎为零的占有空间;
- 几乎为零的价格。

因此,也可以毫不夸张地说,没有光纤,信息高速公路也许无“路”可走,当今信息革命的新纪元也许无从谈起。

在光纤损耗不断降低的同时,光源研究的进展亦十分迅速。1962年,GaAs 半导体激光二极管(LD)问世,意味着现代光通信有了小体积的高速光源。GaAs-LD 的发射波长为870 nm,在掺杂铝后移到了光纤的短波长低损耗窗口。后来,GaAsAl-LD 又实现了室温长时间工作。利用四元系合金 InGaAsP 制造出了1300 nm及1550 nm的 LD 光源。由于 LD 昂贵,适合光纤通信的高亮度 LED 也研制了出来。这样,随着符合光纤传输要求,各种波长、高效率、长寿命、高速率半导体光源的研制成功,光纤通信的实用化及大发展已是水到渠成。LD 输出进入单模光纤的功率约为1 mW。在光纤通信中又常用 dBm 作为功率单位,它是

$$P(\text{dBm}) = 10 \lg \frac{P(\text{mW})}{1(\text{mW})} \quad (1.1.1)$$

因此, $P = 1 \text{ mW}$ 即为0 dBm, $1 \mu\text{W}$ 即为-30 dBm。

此外,在光接收机的研究方面,各种波长范围的高效率、高速率半导体光电转换器件(如 APD、PIN)也陆续问世。1973年,S. D. Personick 发表了有关 PCM 数字光接收机分析的论文,解决了现代光纤通信系统中光接收机的设计问题。数字接收机的灵敏度是很高的,如 2.5 Gb/s的信号时可达-30 dBm( $1 \mu\text{W}$ )。那末对于似乎很小的1 mW发送功率,光纤损耗为0.2 dB/km时,仅从损耗而言的传输距离就可达100 km以上。

此外,为了满足系统应用的需要,各种光无源器件(如光纤活动连接器、光衰减器、光波分复用器、隔离器及分路器等)及专用仪器设备(如光纤熔接机、时域反射计、光功率计等)也陆续配套商用。

1974年左右,许多国家进行了各种室内的光纤通信传输实验,1976年后出现了各种实用的光纤通信系统,1980年美国电报电话公司的45 Mb/s光纤通信系统 FT-3 实现商用。从20世纪80年代起进入了光纤通信高速发展的时期,经历了从短波长到长波长、从多模光纤到单模光纤、从低速率到高速率的发展过程。至今,商用光纤通信系统的发展已经历四代,即850 nm波长多模光纤的第一代系统(1980~)、1300 nm波长单模光纤的第二代系统(1983~)、1550 nm单模光纤单频激光器的第三代系统(1991~)及采用光放大器的第四代系统

(1995 ~)。全世界已铺设的光缆总长达几千万公里,我国亦铺设了数十万公里,形成了遍布全国、全世界的陆地及海底光纤网。从 2.5 ~ 10 Gb/s 的系统均已实用化并大量应用,40 Gb/s 的超高速光纤通信技术进展亦十分迅速。图 1.1.1 为通信系统容量的发展图,可见只有采用了光纤通信后才实现指数式的增长。

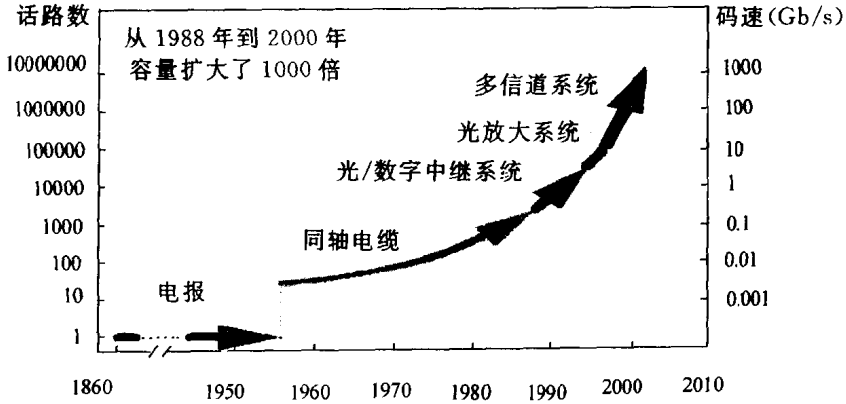


图 1.1.1 通信容量发展图

为了充分发挥光纤的带宽潜力,克服光纤损耗及色散的影响、延长中继距离、扩大传输容量及降低成本,一直是光纤通信的发展目标。各种光纤通信新技术不断出现,系统的码速距离积一再提高,几乎每 4 年增加一个数量级。这些新技术包括:

- (1) 有源及无源光器件、系统端机的集成化与模块化,提高速率与性能,简化结构降低成本,是系统发展最主要的技术基础;
- (2) 波分复用(WDM, Wavelength Division Multiplexing)技术,实现单根光纤上超高速、超大容量传输;
- (3) 光放大器技术,尤其是掺铒光纤放大器(EDFA, Erbium-Doped Fiber Amplifier)及光放大器在长途干线系统以及用户分配系统中的应用;
- (4) 孤子通信技术;
- (5) 高速光纤网技术,全光网技术等。

发展这些新技术的宗旨,都是为了更好地满足日益增长的信息需求。其中,WDM 技术与光放大器技术的完美结合,极大地提高了光纤通信系统的性能与通信容量,成为现代光通信技术的闪亮明珠,通向全光通信网的桥梁。因此,本书修订时特别加强了这方面的内容。

## 1.2 光纤通信系统

一个典型的点 — 点光纤通信系统(图 1.2.1) 主要包括收发信电端机、光发送接收端机、传输光纤等几部分。从光发送机到光接收机是光信息的传输通道,称为光信道,其任务是把信息可靠有效地从始端传送到终端。各部分的作用如下:

- (1) PCM 电端机 需传输的信息信号包括话音、图像及计算机数据等,电端机就是常规电通信中的载波机、图像设备及计算机等终端设备。对数字通信来说,信号在电端机内要进行 A/D 及 D/A 转换,变换成数字信号。
- (2) 光发送机 包括光源(LD 或 LED)及其驱动电路,电端机来的电信号经编码后调制光源,产生载有信息的光信号,完成电-光(E/O)转换。

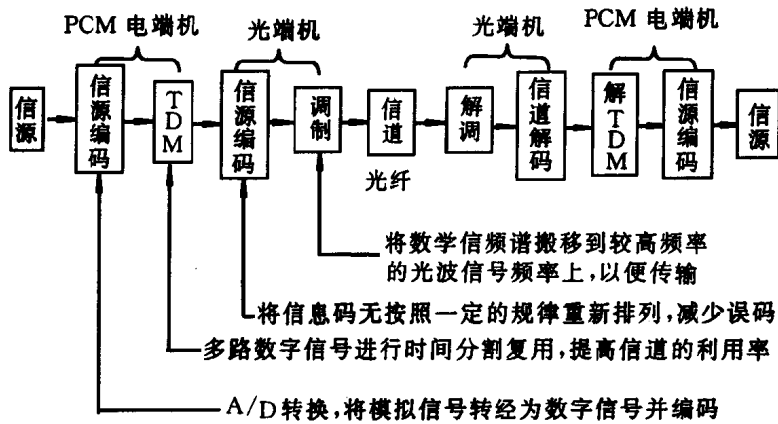
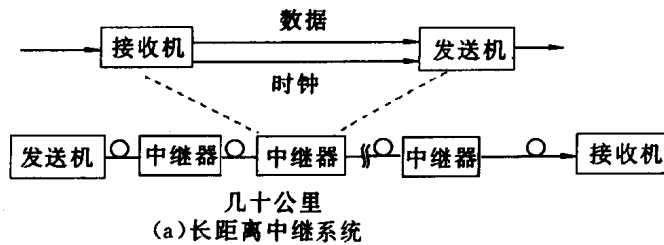


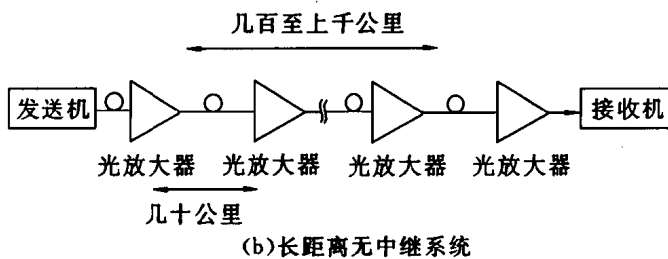
图 1.2.1 点-点光纤通信系统构成框图

(3) 传输光纤或光缆 将光源发射的光信号传送到远处的接收端，它可以是多模光纤或单模光纤。

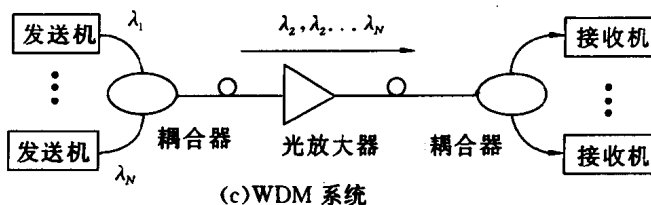
(4) 光接收机 完成光-电(O/E)转换。接收的光信号由光检测器检测转换成电信号，然后放大解调、判决再生，送入电端机恢复出原信号。



(a)长距离中继系统



(b)长距离无中继系统



(c)WDM系统

图 1.2.2 长距离光纤通信系统

在长途光纤通信系统中，每隔一段距离需设置中继器，以把经过长距离传输衰减变得很微弱并畸变的光信号进行光检测变成电信号，经放大整形再生后驱动光源，产生光信号再送入光纤传输，这就是传统的光-电-光中继器(图 1.2.2(a))。然而现在，光放大器，尤其是

EDFA 已经成熟,其增益高、输出功率大、噪声低、带宽大、码速穿透,完全可代替光-电-光中继器,正推动着光纤通信技术的革命——新一代全光通信技术(图 1.2.2(b))。图 1.2.2(c) 为 WDM 系统的示意图,几个~几百、上千个波长在单根光纤中一起传输,用 EDFA 中继放大,使传输容量提高几倍~几百、上千倍,代表新一代高速大容量光纤通信技术的发展方向与研究热点。

若干个点对点通信系统组合就构成通信网(图 1.2.3),以提供异地用户之间通信。通信网又可分为公共通信网和专用通信网。公共通信网向全社会用户提供通信服务,如电话网及公共数据网等。专用通信网是为特定用户或单位服务的通信网,如铁路、电力、军事等部门的通信网及计算机网、CATV 网等。这些网传统上都采用电缆或微波,但当今通信信息量剧增,它们已难以胜任,采用光纤通信技术已是大势所趋。

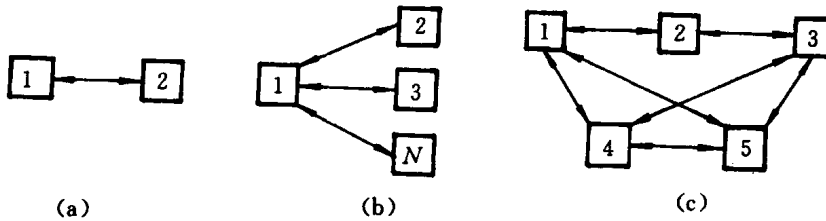


图 1.2.3 光纤通信系统的拓扑结构

(a)点对点系统; (b)一点对多点系统; (c)光纤网

光纤通信技术的基本内容有:

- (1) 光纤传输理论与技术、光纤器件;
- (2) 信号传输原理、调制解调方式、信号编码及信道复用等;
- (3) 光源与光发送机;
- (4) 光检测器与光接收机;
- (5) 光纤通信系统的设计、结构及应用;
- (6) 光纤通信技术,如光放大器技术、WDM 技术、全光网络技术 etc.

本书第 2 至 6 章将对上述内容进行深入讨论。

## 2 光纤

光纤是光波的传输媒质,其特性十分重要。光纤特性包括它的结构特性、光学特性及传输特性。结构特性主要指光纤的几何尺寸(芯径等),光学特性包括折射率分布、数值孔径等,传输特性主要是指损耗及带宽特性。本章在简要介绍光纤结构及分类的基础上,首先用光线法分析多模光纤及平面光波导的传输原理,然后用波动理论讨论单模光纤的模式特性,接着对光纤的损耗、色散及非线性特性进行详细介绍。在介绍了光纤光栅及几种常用光纤无源器件后,最后简要介绍聚合物光纤及光子晶体光纤。

### 2.1 概述

光纤的典型结构是多层同轴圆柱体(图 2.1.1),自内向外为纤芯、包层及涂覆层。通信光纤的纤芯通常是折射率为  $n_1$  的高纯  $\text{SiO}_2$ ,并有少量掺杂剂(如  $\text{GeO}_2$  等),以提高折射率。包层折射率为  $n_2 (< n_1)$ ,通常也由高纯  $\text{SiO}_2$  制造,掺杂  $\text{B}_2\text{O}_3$  及 F 等以降低折射率。纤芯和

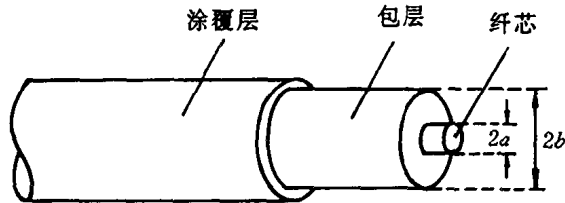


图 2.1.1 光纤结构

包层合起来构成裸光纤,光纤的光学特性及传输特性主要由它决定。对于通信石英光纤,多模光纤的芯径大多为  $50 \mu\text{m}$ ,单模光纤芯径仅  $4 \sim 10 \mu\text{m}$ 。它们的包层外径一般为  $125 \mu\text{m}$ 。在包层外面是  $5 \sim 40 \mu\text{m}$  的涂覆层,材料是环氧树脂或硅橡胶,其作用是增强光纤的机械强度。再外面还常有缓冲层(厚  $100 \mu\text{m}$ )及套塑层。此外,纤芯及包层材料也可由玻璃或塑料制造,它们的损耗比石英光纤大,但在短距离的光纤传输系统中仍有一定的应用。

套塑后的光纤(称为心线)还不能在工程中使用,必须成缆。把数根、数十根光纤绞绞或疏松地置于特制的螺旋槽聚乙烯支架里,外缠塑料绑带及铝皮,再被覆塑料或用钢带铠装,加上外护套后即成为光缆。光缆的种类很多,图 2.1.2 为两个光缆剖面的例子。

根据横截面上的折射率分布,光纤可分为两大类,即阶跃(SI)型和梯度(GI)型。阶跃型光纤中的折射率分布为

$$n(r) = \begin{cases} n_1 & r \leq a \\ n_2 & r > a \end{cases} \quad (2.1.1)$$

梯度光纤中的折射率分布(图 2.1.3)为

$$n(r) = \begin{cases} n_1 \left[ 1 - 2\Delta \left( \frac{r}{a} \right)^\alpha \right]^{\frac{1}{2}} & r \leq a \\ n_1 (1 - 2\Delta)^{\frac{1}{2}} = n_2 & r > a \end{cases} \quad (2.1.2)$$



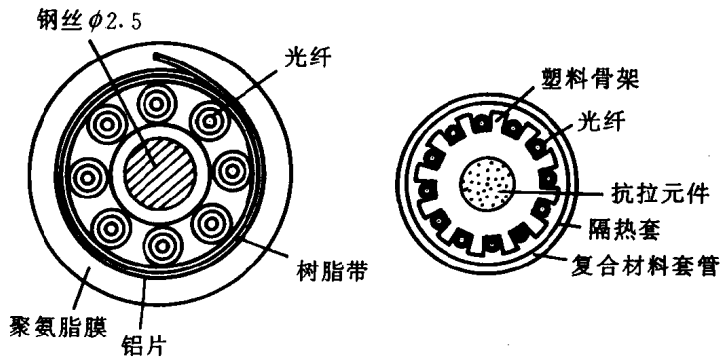


图 2.1.2 光缆结构

式中:  $a$  为纤芯半径;  $\alpha = 1 \sim \infty$ , 当  $\alpha \gg 10$  时, 折射率分布为阶跃型,  $\alpha = 1$  时为三角形。梯度光纤中通常取  $\alpha \approx 2$ , 即按平方律分布。定义

$$\Delta = \frac{n_1^2 - n_2^2}{2n_1^2} \approx \frac{n_1 - n_2}{n_1} \quad (2.1.3)$$

为相对折射率差。在石英光纤中,  $n_1 \approx 1.5$ ,  $\Delta \approx 0.01$ , 即包层折射率仅比芯层略低一点。

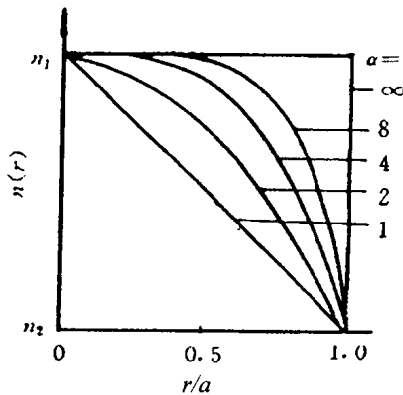


图 2.1.3 梯度光纤纤芯中的折射率分布

按光纤中传输模式的多少, 光纤分为多模光纤和单模光纤两类。显然, 单模光纤中只能传输一个模式, 多模光纤则能承载成百上千个模式。图 2.1.4 示出了几类光纤的简要特点。

光纤通信对光纤的要求为:

- (1) 低传输损耗;
- (2) 高带宽和高数据传输速率;
- (3) 与系统元件(光源、光检测器等)的耦合损耗低;
- (4) 高的机械稳定性;
- (5) 在工作条件下光和机械性能的退化慢;
- (6) 容易制造。

目前, 用石英及塑料制造的各种光纤, 能很好地满足上述要求, 适合各种光纤传输系统的应用。表 2.1.1 为成缆后的光纤典型特性, 可供参考。