

光纤通信基础

GUANGXIAN TONGXIN JICHU

李玲 黄永清 编著



国防工业出版社

光纤通信基础

李玲 黄永清 编著

国防工业出版社

·北京·

DW 14/17
图书在版编目(CIP)数据

光纤通信基础/李玲,黄永清编著. - 北京:国防工业出版社, 1999.2

ISBN 7-118-01936-4

I. 光… II. ①李…②黄… III. 光纤通信-基础理论
IV. TN929.11

中国版本图书馆 CIP 数据核字(98)第 14707 号

国防工业出版社 出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号)

(邮政编码 100044)

河北三河市腾飞胶印厂印刷

新华书店经售

*

开本 850×1168 1/32 印张 13 $\frac{1}{8}$ 345 千字

1999 年 2 月第 1 版 1999 年 2 月北京第 1 次印刷

印数:1—3000 册 定价:19.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

前 言

光纤通信在迅速发展,新技术不断涌现,可以说是日新月异,一日千里。要想在一本书中反映这种丰富多采的千变万化是困难的,甚至是不可能的。目前已有不少光纤通信方面的著述,其内容多偏重光纤通信设备及系统的描述。本书的侧重面稍有不同。作为《光纤通信基础》,编者选择了构成光纤通信特点而有别于其它通信方式的那些内容成书。不管光纤通信如何发展、变化,这些基本原理与基础知识都是有用的。

编者认为,构成光纤通信特点而有别于其它通信方式的主要内容目前是:光纤通信的传输媒质——光导纤维;光有源器件——光源、光放大器、光电探测器;光无源元件。有了这些基础,就为学习光纤通信及其新技术提供了条件。本书将以这些内容为主,较系统地阐述其基本原理与特性。同时,结合这些内容对光纤通信的一些新技术也作简单的介绍。

本书共分七章。第一章绪论,对光纤通信作了总体介绍。第二章、第三章为光纤传输,讨论了光导纤维的传输原理及特性。第四章光无源元件,介绍了典型的、常用的光无源元件。第五章光源,第六章光放大器,第七章光电探测器,分别介绍了这些有源光器件的原理与特性。

第一、二、三、四、六章由李玲编写,第五、七章由黄永清编写。

书中,光纤非线性及光孤子传输,部分地采用了王宏博士的手稿;第四章部分地采用了郭建恩博士的手稿;第六章部分地采用了曹忠博士的手稿。全书成书得到郭建恩博士的大力协助,在此一并表示感谢。

书中错误和不足之处,望同行和读者指正。

编 者

内 容 简 介

本书侧重那些构成光纤通信特点，使之有别于其它通信方式的内容。全书共七章，系统论述了光纤通信所用的光导纤维、光源、光放大器、光电探测器、常用光无源元件的原理与特性。本书适合通信及电子学领域的高等学校高年级学生阅读，并可供有关科技人员参考。

目 录

第一章 绪论	1
§ 1 概述	1
§ 2 光纤通信的发展概况	2
§ 3 光纤通信系统	6
3-1 光纤通信系统方框图	6
3-2 光纤通信的主要光元器件介绍	8
§ 4 光纤通信的优点	12
4-1 频带宽, 信息容量大	12
4-2 损耗低, 传输距离长	13
4-3 体积小, 重量轻, 便于敷设	13
4-4 抗干扰性好, 保密性强, 使用安全	13
4-5 材料资源丰富	13
第二章 光导纤维的传输原理	15
§ 1 平面波在两介质交界面上的全反射与介质 薄膜波导	19
1-1 平面波在两均匀介质交界面上的反射和折射	20
1-2 薄膜波导中的波	31
§ 2 阶跃光纤	43
2-1 阶跃光纤中的射线法概念	43
2-2 阶跃光纤的波动理论解法	46
§ 3 渐变光纤	62
3-1 渐变光纤中的光射线	63
3-2 平方律折射指数分布光纤的波动理论解法	68
§ 4 单模光纤	75
4-1 单模光纤的结构特点	75

4-2	阶跃折射指数分布和无界平方律折射指数分布	
	单模光纤	77
4-3	单模光纤的等效近似分析法	79
第三章	光纤的传输特性与特种光纤	83
§ 1	光纤的损耗特性	83
1-1	光纤损耗的起因	83
1-2	光纤的总损耗, 损耗谱	88
§ 2	光纤的色散特性	88
2-1	光纤色散概述	89
2-2	无界材料中的色散——材料色散	100
2-3	单模光纤的色散及特种色散光纤	105
2-4	多模光纤的色散	112
2-5	脉冲在光纤中的传输	113
§ 3	光纤的双折射及偏振特性	115
3-1	线双折射	116
3-2	圆双折射	125
3-3	保偏光纤与低双折射光纤	128
§ 4	光纤的非线性	133
4-1	历史的回顾	134
4-2	重要的光纤非线性效应	134
4-3	光孤子与光孤子通信	145
第四章	光无源元件	153
§ 1	光无源元件的结构形式	153
1-1	体块型光无源元件	153
1-2	全光纤型光无源元件	154
1-3	光波导型光无源元件	154
§ 2	光纤的接续损耗与光纤连接器	156
2-1	光纤的连接损耗	156
2-2	光纤连接器	167
2-3	光纤的永久性连接	173
§ 3	光波导的横向耦合与耦合器	175
3-1	两光波导之间的横向耦合	177

3-2	2×2 定向耦合器	180
3-3	星形耦合器	185
§ 4	波分复用元件	186
4-1	F—P 腔型光滤波器	187
4-2	马赫—泽德(M—Z)型光滤波器	197
4-3	光栅型波分复用器	200
§ 5	光学谐振腔	211
5-1	均匀平面波近似	212
5-2	金属闭腔近似	214
5-3	谐振腔的损耗、光子寿命、品质因数	219
§ 6	光调制器	222
6-1	简述	223
6-2	相位调制器	224
6-3	强度调制器	227
6-4	调制器的参数	234
§ 7	偏振控制器	235
§ 8	光隔离器	238
第五章	光纤通信中的光源	241
§ 1	激光产生的基本原理	241
1-1	原子的能级结构	241
1-2	光的辐射和吸收	242
1-3	激光产生的条件	246
§ 2	半导体激光器的基本概念	253
2-1	半导体晶体的能带	253
2-2	半导体材料中的光发射与光吸收	254
2-3	PN 结	257
2-4	半导体激光器材料的要求	262
§ 3	半导体激光器的激射原理与结构	266
3-1	半导体激光器的激射原理	266
3-2	半导体激光器的结构	270
§ 4	半导体激光器的稳态特性	275
4-1	半导体激光器的电光耦合速率方程	275

4-2	半导体激光器的 $P-I$ 特性	276
4-3	半导体激光器的温度特性	278
4-4	半导体激光器的效率	279
4-5	半导体激光器的远场特性	281
4-6	半导体激光器的模式特性	282
4-7	半导体激光器的光谱特性	284
§ 5	半导体激光器的调制特性	287
5-1	瞬态过程	288
5-2	调制响应	290
§ 6	发光二极管(LED)	295
6-1	发光二极管的结构	295
6-2	发光二极管的工作特性	297
§ 7	动态单纵模半导体激光器	302
7-1	分布反馈半导体激光器和分布布拉格反射半导体激光器	304
7-2	耦合腔半导体激光器	306
第六章	光放大器	310
§ 1	引言	310
1-1	光放大器在光纤通信中的作用	310
1-2	光放大器的分类	312
1-3	掺铒光纤放大器简介	314
§ 2	EDFA 的结构与工作原理	317
2-1	EDFA 的基本结构	317
2-2	EDFA 的工作原理	318
2-3	EDFA 的几个重要概念	323
2-4	EDFA 的主要特性与指标	330
§ 3	EDFA 的分析方法及特性	337
3-1	等效受激跃迁几率 γ 和泵浦率 γ_p	337
3-2	单向泵浦 EDFA 的理论模型	338
3-3	EDFA 的特性	343
§ 4	EDFA 在光纤通信系统中的应用	346
4-1	EDFA 的主要应用方式	346
4-2	EDFA 的应用举例	349

§ 5 其它波段的掺杂光纤放大器	353
5-1 0.81 μm 波段掺铊光纤放大器	353
5-2 0.85 μm 波段掺铟光纤放大器	353
5-3 1.3 μm 波段掺镨光纤放大器	353
5-4 1.3 μm 波段掺铽光纤放大器	354
5-5 2.7 μm 波段掺铒光纤放大器	355
第七章 光纤通信中的光检测器	356
§ 1 PIN 光电二极管	356
1-1 半导体 PN 结的光电效应	356
1-2 PIN 光电二极管的原理和结构	359
1-3 PIN 光电二极管的特性	362
§ 2 雪崩光电二极管	371
2-1 雪崩光电二极管的工作原理及结构	371
2-2 雪崩光电二极管的特性	373
§ 3 用于光纤通信的光检测器	380
3-1 异质结光检测器	381
3-2 超晶格雪崩光电二极管	384
3-3 光电晶体管	385
3-4 用于波分复用的光检测器	386
3-5 集成接收器件	387
3-6 微腔光电二极管	387
附录	389
附录 I 弯曲光纤的双折射	389
附录 II 偏振光的算法——琼斯矩阵法	391
附录 III 电光晶体的特性	397
英汉缩略语索引	403
参考文献	410

第一章 绪 论

§ 1 概 述

1970 年被称为光纤通信元年。在这一年发生了通信史上的两件大事:一是由被称为世界光纤之父的华裔科学家高锟提出的、用作光通信传输媒质的光导纤维,其损耗降到 20dB/km ;二是美国贝尔实验室制作出可在室温下连续工作的铝镓砷(AlGaAs)半导体激光器。这两项科学成就为光纤通信的发展奠定了基础。此后,光纤通信以令人眩目的速度发展起来,70 年代中期即进入了实用化阶段。至 1983 年,美、日、德、法、英、荷、意等国先后宣布:在长途通信干线方面将不再敷设电缆,而采用光缆。至今,光纤通信应用已遍及长途干线、海底通信、局域网、有线电视等各领域。如从 1970 年算起,自研制到全面推广,时间用了不到 15 年。其发展速度之快,应用范围之广,规模之大,涉及学科之多(光、电、化学、物理、材料等),是前此任何一项新技术所不能与之相比的。现在,光通信的新技术仍在不断涌现,生产规模不断扩大,成本不断下降,显示了这一技术的强大生命力和广阔应用前景。它将成为信息高速公路的主要传输手段,是将来信息社会的支柱。

通信发展的目标,是适应社会生产力的发展,不断提高传输容量,延长通信距离及开拓新的业务。纵观电信技术的发展进程,可看到一个明显的特点:其频率是由低频端向高频端扩展的。可以说通信技术的发展历史是不断开拓更高频段或更短波长的历史。从长波、中波、短波、超短波到微波,这期间平均每 6 年使频率递增一个数量级。后来从微波越过很宽的频率跨度,一举进入光纤通信时代。

图 1-1 表示出光的波谱。目前采用的光纤通信波长在近红外波段。已开发的有 $\lambda_0 = 0.85\mu\text{m}$, $\lambda_0 = 1.3\mu\text{m}$, $\lambda_0 = 1.55\mu\text{m}$ 三个波段。前者称为短波长波段, 后二者称为长波长波段。该三波段是石英光纤的低损耗窗口。

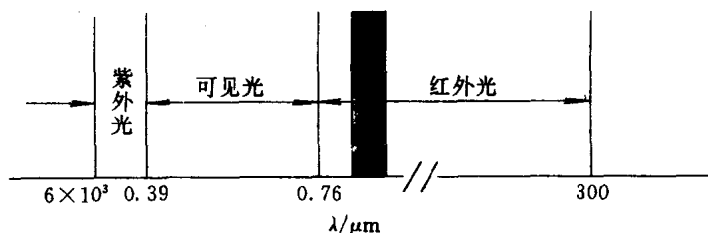


图 1-1 光的波谱图
(阴影部分是现用光纤通信波段)

§ 2 光纤通信的发展概况

说到光通信的发展, 人们常追溯到 3000 年前的烽火台。在这方面, 我们的祖先是应用光通信的先驱。古希腊也曾用过烽火台, 但比我国晚了 200 年。到 1791 年, 法国人发明了信号灯, 此后利用‘灯语’的通信, 在欧洲风行一时, 于 1844 年达到鼎盛。早在 17 世纪中叶, 就发明了望远镜, 这极大地延长了目视光通信的距离。至今, 信号灯、旗语、望远镜都是仍在应用的目视光通信手段。但这些与现代光通信有很大差别, 严格说来, 不能算作真正的光通信。

现代光通信是从 1880 年贝尔发明‘光话’开始的。他以日光为光源, 大气为传输媒质, 传输距离是 200m。1881 年, 他发表了论文《关于利用光线进行声音的复制与产生》。但贝尔的光话始终未走上实用化阶段。究其原因有二: 一是没有可靠的、高强度的光源; 二是没有稳定的、低损耗的传输媒质, 无法得到高质量的光通信。在此后几十年的时间里, 由于上述两个障碍未能突破, 也由于

电通信得到高速发展,光通信的研究一度沉寂。这种情况一直延续到本世纪 60 年代。

1960 年,第一台相干振荡光源—红宝石激光器问世。激光器(Laser——Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation)可产生频谱纯度很高的光波。它的出现激起了世界性的光通信研究热潮,给沉寂已久的光通信研究注入了活力。但气体和固体激光器体积大、效率低,不适合在光通信中应用。

1962 年半导体激光器出现。虽然这种早期的 PN 结砷化镓(GaAs)半导体激光器只能短时间在液态氮制冷得到的低温下脉冲工作,但它还是给光通信的实用化光源带来了希望。1970 年,首次研制出在室温下连续工作的双异质结半导体激光器,为实用化的通信光源奠定了基础。

自从第一只激光器问世,就开始了激光通信的研究。激光通信的研究是从大气光通信开始的。大气光通信以大气作传输媒质。这种传输方式的缺点是损耗大,受气候环境影响严重,传输不稳定,且需要很高的设备费用。目前只对地球-宇宙通信有一定的吸引力。

在研究大气光通信的同时,进行了各种光波导的研究,其中包括光导纤维。光导纤维以内部全反射限制光波的传输原理早为人们熟知,并已作为短距离的传光媒质用于医学上的胃镜。但当时作为光导纤维材料的石英玻璃损耗很大。直到 60 年代中期,优质光学玻璃的损耗仍高达 1000dB/km 。这意味着:如在 1km 的光纤上传输 $\lambda_0 = 1\mu\text{m}$ 的光信号,且在接收端只要求收到一个光子,则所需的入纤光能为 $2 \times 10^{81}\text{J}$ 。这相当于太阳在 10^{47} 年发出的全部光能(如果发射波长全在 $1\mu\text{m}$ 的话)。这是惊人的天文数字!

就在这种将光学纤维用作通信传输手段毫无希望的情况下,英国标准电信研究所的华裔科学家高锟博士于 1966 年发表了一篇重要论文,提出利用带有包层材料的石英玻璃光纤作为光通信的传输媒质。他指出:光导纤维的高损耗不是其本身固有的,而是

由材料中所含的杂质引起的。如果降低材料中的杂质含量,便可极大地降低光纤损耗。他还预言,通过降低材料的杂质含量和改进制造工艺,可使光纤的衰减下降到 20dB/km ,甚至更小。这一推断引发了世界上几个主要实验室在这一领域的研究工作。1970年,美国康宁(Corning)玻璃有限公司果然制成了衰减为 20dB/km 的低损耗石英光纤。这是光通信发展史上的一个划时代事件。它使人们确认光导纤维完全能胜任作为光通信的传输媒质,从而确立了光通信向光纤通信发展的明确目标,揭开了光纤通信发展的新篇章。

应该指出的是:这一时期的半导体光源工作波段也在 $0.85\mu\text{m}$,恰与早期光纤的低损耗窗口波长一致。这一幸运的巧合,无疑加快了光通信发展的进程。

光纤通信经过 20 年的发展,已有四代(另一说法是三代)光纤通信进入了使用。

第一代光纤通信的工作波长 $\lambda_0 = 0.85\mu\text{m}$,属短波长波段,传输光纤用多模光纤。光源使用铝镓砷半导体激光器,光电检测器为硅(Si)材料的半导体 PIN 光电二极管或半导体雪崩光电二极管(APD——Avalanche Photodiode)。这一代光通信以 1977 年美国芝加哥进行的码速率为 44.736Mbit/s 的现场实验为标志。

第二代光纤通信的工作波长为 $\lambda_0 = 1.3\mu\text{m}$,传输用多模光纤。该波段属长波长波段,是石英光纤的第二个低损耗窗口,有较低的损耗且有最低的色散。相应的光源是长波长铟镓砷磷/铟磷(InGaAsP/InP)半导体激光器,光电探测器采用锗(Ge)材料。

1984 年实现了波长 $\lambda_0 = 1.3\mu\text{m}$ 单模光纤通信系统,这是第三代光纤通信。单模光纤较多模光纤色散低得多,损耗也更小。这代光纤通信广泛地用于长途干线和跨洋通信中。

80 年代中后期又实现了 $\lambda_0 = 1.55\mu\text{m}$ 单模光纤通信,这是第四代。 $1.55\mu\text{m}$ 是石英光纤的最低损耗窗口。后来,工作波长为 $1.55\mu\text{m}$ 的掺铒光纤放大器问世,又使这一波长具有更重要的意

义。

在光纤通信发展史上另一重要里程碑是掺铒光纤放大器(EDFA——Erbium Doped Fiber Amplifier)的出现。1986年英国南安普敦大学制作出了最初的掺铒光纤放大器。它是在光纤基质中加入铒粒子作激光工作物质,用氩(Ar)离子激光器作泵浦源,能对 $1.55\mu\text{m}$ 的光信号进行直接放大。这种采用笨重的氩离子激光器作泵浦源的光纤放大器显然不可能在光纤通信中实用,但能直接对 $1.55\mu\text{m}$ 波长的光信号进行放大本身却对光纤通信的发展具有重大意义。在此之前,由于不能直接放大光信号,所有的光纤通信系统都只能采用光—电—光中继方式。即先将光信号变为电信号,在电域内进行放大,再生等信息处理,然后再变成光信号在光纤中传输。光纤放大器可直接放大光信号,这就可使光—电—光中继变为全光中继。这是一次极为重要的飞跃,其意义可与当年用晶体管代替电子管相提并论。因此,这一发明激起了世界性的研究热潮。其形势恰如一石激千浪,把光通信推向了一个新的阶段。当作为掺铒光纤放大器泵浦源的 $0.98\mu\text{m}$ 和 $1.48\mu\text{m}$ 的大功率半导体激光器研制成功后,掺铒光纤放大器趋于成熟,进入了实用化阶段。掺铒光纤放大器的意义不仅在于可进行全光中继,它还在多方面推动了光纤通信的发展,引起了光纤通信的革命性变革。其中最突出的是在波分复用(WDM——Wavelength Division Multiplex)光纤通信系统中的应用。波分复用是在一根光纤上传输多个光信道,从而充分利用光纤带宽,有效扩展通信容量的光纤通信方式。由于掺铒光纤放大器具有约 40nm 的极宽带宽,可覆盖整个波分复用信号的频带,因而用一只掺铒光纤放大器就可取代与信道数相应的光—电—光中继器,实现全光中继。这极大地降低了设备成本,提高了传输质量。这一优越性推动了波分复用技术的发展。现在EDFA+WDM已成为高速光纤通信网发展的主流,代表新一代的光纤通信技术。可以说掺铒光纤放大器技术已经成熟,我们已迎来了掺铒光纤放大器的黄金时代。

§ 3 光纤通信系统

3-1 光纤通信系统方框图

目前实用的光纤通信系统都是采用强度调制/直接检测(IM/DD——Intensity Modulation/Direct Detection)方式。强度调制是在发送端用所传的电信号去改变光信号的强度;直接检测是指在接收端用光检测器把调制的光波变为原来的电信号。

图 1-2 给出了几种典型的光纤通信系统方框图。

图 1-2(a) 为单信道的光—电—光中继的数字通信方框图。图中的电端机就是一般的电通信设备,如数字脉冲编码(PCM)发

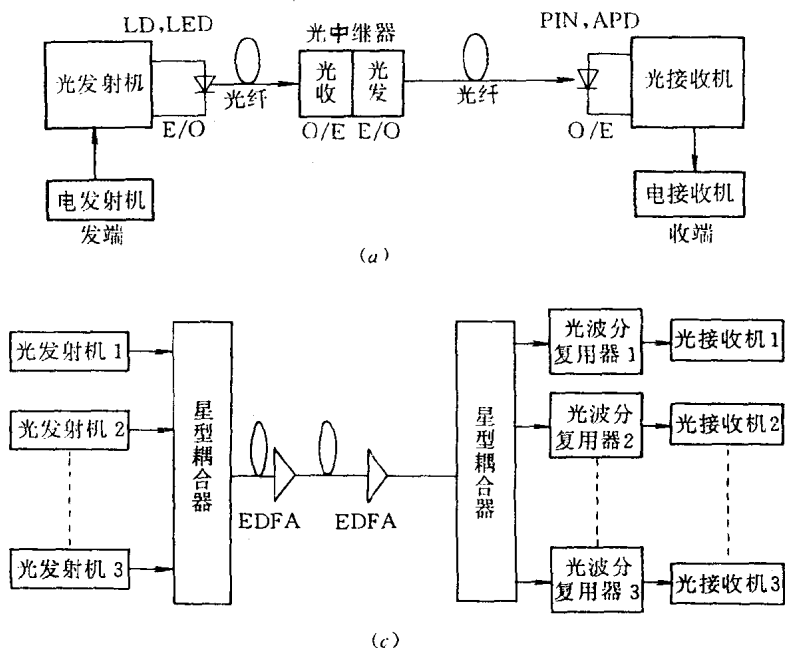


图 1-2 典型的光纤

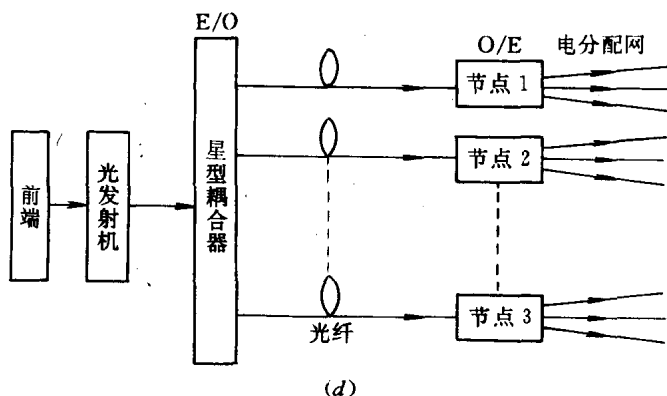
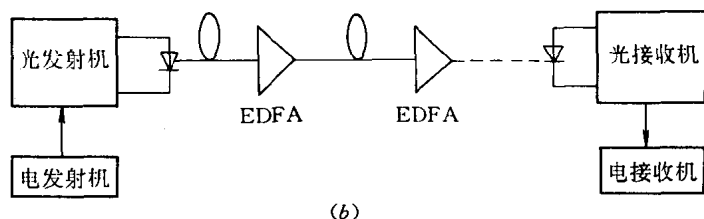
(a) 单信道光—电—光中继数字通信方框图;

(c) 波分复用 + 掺铒光纤放大器数字通信方

射机、接收机。光发射端机的主要作用是将电信号转换成光信号，这叫电/光(E/O)转换，而后将光信号耦合到光纤中去。发射机的主要器件是光源，它采用半导体激光器(LD——Laser Diode)或半导体发光二极管(LED——Light Emitting Diode)。光接收机的作用是将由光纤接收来的光信号转换成电信号，这叫光/电(O/E)转换。电信号经电处理后送入电接收端机。光接收机的主要部件是光电探测器。

在收发端机之间，常加若干光中继器。它包括光接收和光发送设备。在这里，光信号先变成电信号进行电处理，再变成光信号传到下一中继站。图中画出了一个光中继器作代表。

沿途须进行光—电—光中继是这种系统的特点。



通信系统方框图

(b)单信道全光中继数字通信方框图；

框图；(d)光纤有线电视分配网。