

邮 电 高 等 学 校 教 材

光 纤 通 信

李 玲 主 编



人民邮电出版社

邮电高等学校教材

光 纤 通 信

李 玲 主编

人民邮电出版社

内 容 提 要

本书以强度调制/直接检测光纤通信方式为主线,全面系统地论述了光纤通信的主要问题:传输、元器件、光端机、系统、网和测量。对光纤通信的新技术也做了介绍。本书理论性、实用性并重,着眼于现用,又兼顾新的发展。

本书是为大学通信专业的高年级学生写的,也可供工程技术人员及管理人员参考。

邮电高等学校教材

光纤通信

李 玲 主编

人民邮电出版社出版

北京朝阳门内南竹杆胡同 111 号

北京顺义兴华印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经售

开本: 850×1168 1/32 1995 年 10 月第一版

印张: 11.25 1995 年 10 月第 1 次印刷

字数: 294 千字 插页: 印数: 6 000 册

ISBN 7-115-05639-0/TN·885

定价: 11.00 元

前 言

1986年前后,我们编写了《光纤通信基础》一书,这是我国最早出版的这一领域的高校本科教材之一。近十年来,这本教材在培养光纤通信技术人材方面发挥了它的作用。

在这十年中,光纤通信以惊人的速度发展着,新技术不断涌现,光纤通信的面貌日新月异。在使用上述教材中,逐渐感到原书的内容需要充实、更新,以与光纤通信的发展相适应。在这种情况下,我们组织编写了这本新教材《光纤通信》。

本书以目前应用的强度调制/直接检测(IM/DD)光纤通信技术为主线,较全面地论及了光纤通信中的主要问题:传输、元器件、端机、系统、网、测量。对光纤通信的新技术,如相干光纤通信、波分和频分复用光纤通信、光孤子通信、光纤放大器等也做了介绍。这一部分篇幅不大,但由于作者有亲身的科研体验,所指出的关键问题与关键技术,极具参考价值。

全书共分七章。第一章和第二章由李玲编写,第三章由王庆海编写,第四章和第六章由曹忠编写,第五章和第七章由张小频编写,第八章由管克俭和王庆海编写。全书由李玲统编。

本书经邮电部高校教学指导委员会讨论通过,并提了许多宝贵的修改意见,在此表示感谢。书中不足及错误之处,切望专家和读者批评指正。

编者

1995. 3

目 录

第一章 绪论	1
§ 1 光通信的发展	1
§ 2 光纤通信概述	3
2-1 光纤通信系统的构成	4
2-2 光纤通信发展概况	7
2-3 光纤通信的主要优点	8
§ 3 光纤通信的新技术介绍	9
第二章 光导纤维	12
§ 1 光波在光纤中的传播	14
1-1 阶跃光纤	14
1-2 渐变光纤	32
§ 2 单模光纤	44
2-1 单模光纤结构的特点	44
2-2 阶跃折射指数分布和无界平方律 折射指数分布单模光纤	46
2-3 单模光纤的等效近似分析法	48
§ 3 光纤的主要特性与特种光纤	53
3-1 光纤的损耗特性	54
3-2 光纤的色散特性	58
3-3 单模光纤中的双折射及偏振特性	73
§ 4 光纤传输的无源器件	82
4-1 光纤连接器	83
4-2 X 形光纤定向耦合器和星形耦合器	87
4-3 光隔离器	89
习题	91

第三章 光源和光发射机	94
§ 1 激光产生的物理基础	95
1-1 原子的能级结构	95
1-2 光与物质的相互作用	96
1-3 激光产生的条件	99
§ 2 半导体激光器的原理及结构	104
2-1 半导体材料的能带结构	105
2-2 P-N 结半导体激光器的结构和原理	106
2-3 异质结半导体激光器	109
2-4 单纵模半导体激光器	116
§ 3 半导体激光器的电光耦合速率方程	118
3-1 电光耦合速率方程	119
3-2 阈值电流密度 J_{th}	120
3-3 半导体激光器的 P-I 特性	121
3-4 半导体激光器的电光延迟时间	122
§ 4 半导体激光器的工作特性	123
4-1 伏安(U-I)特性	123
4-2 光功率-电流(P-I)特性	124
4-3 阈值特性	124
4-4 P-I 特性曲线的扭曲现象	126
4-5 转换效率	127
4-6 光谱特性	128
4-7 方向特性	129
4-8 时间响应特性	130
§ 5 发光二极管(LED)及其与激光器特性的比较	130
5-1 发光二极管的结构	130
5-2 LED 的工作特性	132
§ 6 半导体光源与光纤的耦合	134
§ 7 光源的直接调制	137

7-1 光源的数字调制	138
7-2 光源的模拟调制	142
§ 8 光发射机的辅助电路	147
8-1 控制电路	147
8-2 光源的保护电路	152
习题	154
第四章 光检测器与光接收机	156
§ 1 半导体光检测器	157
1-1 半导体 PN 结的光电效应	158
1-2 PIN 光电二极管	160
1-3 雪崩光电二极管	168
1-4 长波长光检测器及高速响应光检测器	174
§ 2 光接收机噪声分析	176
2-1 随机噪声的数学表示	176
2-2 接收机量子极限灵敏度	181
2-3 接收机前端噪声	184
2-4 前置放大电路噪声与前端设计考虑	188
§ 3 数字光接收机灵敏度计算	194
3-1 噪声的高斯分布与误码率计算	194
3-2 PIN 光接收机的误码率与灵敏度	197
3-3 APD 光接收机灵敏度	198
3-4 接收噪声与接收灵敏度公式的修正结果	200
3-5 简化的 Personick 修正法	204
§ 4 模拟接收机	209
4-1 模拟接收机的输出信噪比和接收灵敏度	210
4-2 模拟接收机量子极限灵敏度	212
习题	212
第五章 数字光纤通信系统基础	214
§ 1 简介	214

§ 2 光端机和光中继器的基本结构	218
2-1 光端机的基本结构	218
2-2 光中继器的基本结构	221
§ 3 数字光纤通信系统的主要性能指标	222
3-1 假设数字参考线	222
3-2 系统的质量指标	223
3-3 光接口指标与测试	226
3-4 电接口指标与测试	229
§ 4 数字光纤通信系统的线路码型	232
4-1 扰码	233
4-2 分组码	234
4-3 插入比特码	237
4-4 其它线路码型	241
§ 5 数字光纤通信系统的工程计算	242
5-1 系统功率计算	243
5-2 系统带宽计算	245
§ 6 影响系统性能的其它因素	246
6-1 模式噪声	247
6-2 半导体激光器纵模分配噪声	247
6-3 半导体激光器啁啾现象	249
§ 7 SDH 同步传输网技术	250
7-1 简介	250
7-2 SDH 传输网的基本概念及主要特点	252
7-3 SDH 的速率和帧结构	254
7-4 SDH 的基本复用映射结构	255
7-5 SDH 设备简介	260
习题	263
附录	263
第六章 光纤通信网	265

§ 1 概述	265
§ 2 光纤通信网的体系结构	266
§ 3 光纤网的拓扑结构	269
3-1 几种光纤耦合器	269
3-2 光纤通信网的拓扑结构	271
§ 4 CSMA/CD 光纤总线网	275
4-1 概述	275
4-2 CSMA/CD 协议	276
§ 5 光纤网设计考虑	281
第七章 光纤测量	283
§ 1 光纤折射指数分布测量	284
1-1 近场扫描法	284
1-2 折射近场法	286
§ 2 光纤芯径和数值孔径的测量	289
2-1 远场法	290
2-2 折射近场法	290
§ 3 单模光纤模场直径的测量	291
3-1 远场扫描法	293
3-2 可变孔径法	294
§ 4 单模光纤截止波长的测量	295
§ 5 光纤衰减常数测量	297
5-1 剪断法和插入损耗法	297
5-2 背向散射法	300
§ 6 光纤带宽和色散的测量	303
6-1 多模光纤带宽的测量	303
6-2 单模光纤色散测量	305
习题	309
第八章 先进的光纤通信技术	310
§ 1 相干光纤通信系统	310

1-1 相干光纤通信的基本原理及特点	311
1-2 相干光纤通信的主要技术问题	316
§ 2 频分复用(FDM)光纤通信系统	324
2-1 FDM 光纤通信系统的基本原理、特点 及主要问题	325
2-2 光载波的复用/解复用	326
2-3 FDM 系统中的稳频	328
2-4 信道的随机选择技术	330
2-5 非线性效应对 FDM 系统的影响	332
§ 3 光放大器和光孤子通信	333
3-1 光放大器	334
3-2 光孤子通信	339
参考书目	344
英汉缩略语索引	344

第一章 绪 论

光纤通信是以光波为载频,以光导纤维(Optical Fiber 简称光纤)为传输媒质的新型通信方式。

自 70 年代初第一批低损耗光纤问世以来,光纤通信以惊人的速度迅速由实验阶段进入实用阶段,随即广泛地应用于各通信产业,形成一种新型的通信方式,其应用规模之大,范围之广、涉及到的学科之多,是前此任何一种通信方式所未有的。现在,光纤通信的新技术仍在不断涌现,显示了这一通信技术的强大生命力和广阔的应用前景。

本章将对光纤通信做一概括的介绍,以使读者在进行深入学习之前,对光纤通信有一基本了解。

§ 1 光通信的发展

最早的光通信可追溯到“烽火台”这种目视光通信。在这方面,我们的祖先是光通信的先驱。此后,数千年间,远距离通信一直是用目视光通信来实现的。望远镜的出现,极大地延长了目视光通信的距离。近代光通信的历史要从十八世纪算起。1880 年,贝尔(Bell)发明了第一个光话。他用可见光在数百米的距离上传送了语音。然而这种形式的光通信一直未发展到实用阶段。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,因而难以得到高质量的光通信。在此后几十年里,由于上述两个障碍未能突破,也由于电通信的迅速发展,而使光通信一度沉寂。

纵观电通信技术的发展过程,可以看到一个明显的特点:其频

率是由低频端向高频端发展的。可以说通信技术的发展历史是不断开拓更高频率，或更短波长的历史。从长波、中波、短波、超短波发展到微波，这期间平均每六年使频率递增一个数量级。但到了波长 1mm 附近，却遇到了困难，这使基础技术及通信技术的发展，停滞了很长一段时间。就在这时，出现了通信发展史上两个重大突破：一是室温下连续工作的双异质结半导体激光器的出现，一是低损耗光导纤维的问世。这两种技术的结合促进了光通信的新生，它使通信技术的发展摆脱了困境，跨过 300GHz($1\text{GHz}=10^9\text{Hz}$)到 300THz($1\text{THz}=10^{12}\text{Hz}$)这一频率跨度，而跃入光纤通信时代。

1960 年，第一台相干振荡光源——红宝石激光器问世。激光器(Laser)是基于物质原子、分子内能的变化而构成的光波振荡器。它可产生频谱纯度很高的激光。从原理上讲，有可能把微波通信中所应用的全套通信技术用到激光通信上来。因此，激光器的出现，激起了世界性的光通信研究热潮，给沉寂已久的光通信注入了活力。但气体和固体激光器体积大、效率低，不适合在通信中使用。

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致冷得到的低温下，用脉冲激励来工作，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。它是从大气光通信开始的。大气光通信以大气做传输媒质。这种传输方式的缺点是损耗大，传输不稳定，受气候及环境的影响严重。

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。光导纤维以全反射限制光波的传输原理早为人们熟知，并已做短距离传光媒质用于医学的胃镜。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，优质光学玻璃的传输损耗仍高达 1000dB/km。在用作通信光纤几乎毫无希望的情况下，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,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10dB/km,甚至数dB/km。这一推断引发了世界上几个重要实验室在这一领域的研究工作。1970年美国康宁玻璃公司制成了衰减为20dB/km的低损耗石英光纤。这是光通信发展史上的另一划时代事件,它使人们确认光导纤维完全能胜任做为光通信的传光媒质。原来处于朦胧状态的光通信形象至此豁然明朗,即是说,确立了光通信向光纤通信方向发展的明确目标,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在 $\lambda=0.85\mu\text{m}$,恰与早期光纤的低损耗窗口波长一致。这一幸运的巧合,无疑加快了光纤通信发展的进程。

此后,光纤通信的发展带有爆炸性,至1977年已进入实用化阶段,八十年代初期已大规模推广应用。现在,光纤通信技术的发展状况被看做是衡量一个国家技术水平的标志之一,光纤通信被认为是信息社会的支柱。它将对未来的信息社会发挥巨大的作用,产生深远的影响。

§ 2 光纤通信概述

当前及今后相当长的一个时期,实用光纤通信系统都采用强度调制-直接检测方式(IM/DD——Intensity-modulation/direct-detection)。强度是指单位面积上的光功率,强度调制是指用信号去调制光波的强度,使之随信号电流线性变化;直接检测是指接收机直接在光频检测。这种通信方式的优点是构成简单,成本低廉,就当前光波技术来说切实可行。这种光纤通信方式是本书讨论的重点。

2-1 光纤通信系统的构成

图 1-1 给出了强度调制-直接检测光纤通信系统的示意方框图。它的三个重要组成部分是光发射端机,光接收端机与光纤传输线路。

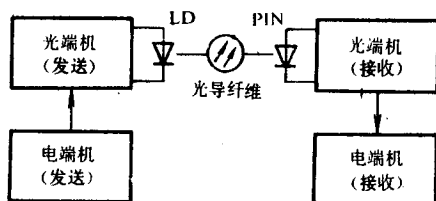


图 1-1 IM/DD 光纤通信系统示意方框图

在光发射端机,输入信号来自 PCM 发送设备,电视图象发送设备等电端机。光端机的主要作用是进行电光转换(记做 E/O)把电信号变成光信号。这通过对光源

的强度调制得到。光接收端机的主要作用是将光信号变成电信号,即进行光电转换(记做 O/E)。这一任务通过光检测器(PD)来完成。所得电信号经过处理后送至电端机。

由上可以看出:上述光纤通信系统中与光波技术直接相联系的是光源、光电检测器和光导纤维。因此对这三部分做进一步说明。

成缆光纤是光纤通信的传输媒介,目前用的光纤为石英系光纤。它属介质波导,其结构如图 1-2 所示。内部圆柱为光纤芯子,折射指数 n_1 ,外部为光纤包层,折射指数 n_2 , $n_1 > n_2$ 。当在两介质交界面上满足全反射条件时,可将光波限制于光纤芯子中来回反射传到终端,这也表示在图 1-2 中。

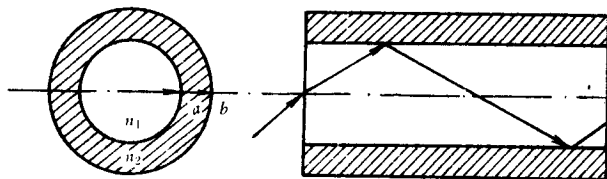


图 1-2 光纤的结构与传光原理

光纤的主要特性之一是传输损耗,这一特性用衰减系数表示,图 1-3 给出了光纤衰减系数随波长 λ 的变化曲线及光纤衰减研究进展

的情况。早期,由于技术上的原因,光纤通信只能利用 $\lambda=0.8\sim 0.9\mu\text{m}$ 波段,因为当时这个波段得到的损耗最小,并且可得到与之匹配的光源和光电探测器。这个波段叫做短波长波段。随着光纤中的杂质浓度的降低,光纤衰减大为减小。 $\lambda=1.3\mu\text{m}$ 和 $\lambda=1.55\mu\text{m}$ 是光纤的另两个低损耗窗口,称为光纤的长波长波段。目前,在 $\lambda=1.55\mu\text{m}$ 波段可得到小于 0.2dB/km 的

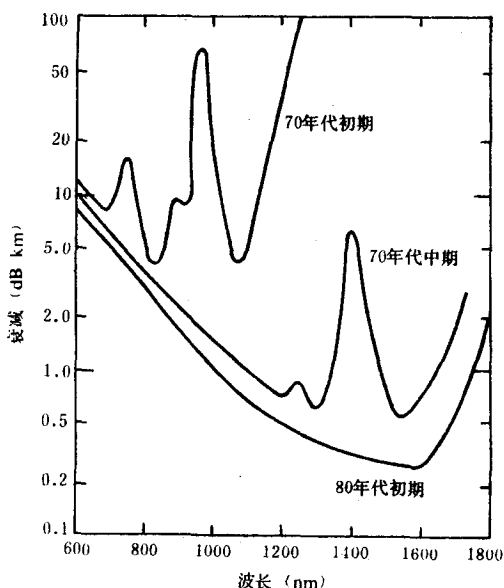


图 1-3 光纤的损耗特性

衰减,已接近光纤固有损耗的限。当更进一步降低光纤的损耗时,可得到在 $\lambda=1.1\sim 1.6\mu\text{m}$ 范围衰减损耗都很小的低损耗光纤。很明显,这极大地扩展了光纤的可用带宽。

光纤的另一特性是色散。色散是指光纤中光波的不同频率成分和模式成分传输速度不同而使信号散开的现象。色散影响光纤的带宽,从而限制光纤的通信容量和传输距离。由于光纤的制作工艺水平的限制,最初的光纤是多模光纤,它较大的色散。后来由多模光纤发展到单模光纤。由于是单模传输,没有模式色散,故其带宽远大于多模光纤,约高 $2\sim 3$ 个数量级。

目前光纤的研究工作仍集中于石英系光纤上。主要是设法将低色散区移到损耗最小的 $1.55\mu\text{m}$ 区域的色散频移光纤和在很宽频带范围内具有平坦的低色散特性的超宽带低色散光纤。

除了石英系光纤外,也在发掘其他光纤材料。一度认为极有应

用前景的是氟化物光纤。它的工作波长在 $2\mu\text{m}$ 以上,称为红外光纤。理论分析其极限损耗可低于 10^{-3}dB/km 。但从目前来看,在较短时间内取代石英系光纤的可能性不大。

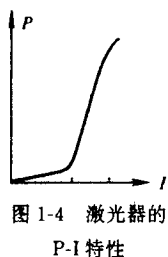


图 1-4 激光器的
P-I 特性

目前,光纤通信中的光源主要采用半导体激光器。它是一个加正向电流即可发光的半导体二极管。以 LD(Laser Diode)表示。其功率(P)-电流(I)的特性如图 1-4 所示。激光器有一阈值电流 I_{th} ,当 $I > I_{th}$ 时才发出激光。在 I_{th} 以上, P 随 I 成线性增加。这种器件特别适用于数字调制。当用信号脉冲电流去驱动激光器时,便可得到相应的光脉冲。

除激光二极管外,也采用半导体发光二极管,记做 LED(Light-Emitting-Diode)。发光二极管发出的不是激光而是荧光。但由于采用 LED 管与多模光纤配合构成的光纤通信系统结构简单,成本低,稳定性好,因而在容量不大,距离不长的光纤通信系统中有很大吸引力。

光源和光电检测器的工作波长必须与光纤的工作波长一致。常用的短波长和长波长半导体激光器的材料分别为 AlGaAs(铝镓砷)和 InGaAsP(铟镓砷磷)。

光纤通信接收所用的光检测器是半导体光电二极管。它们利用半导体物质吸收入射光子后形成的电子-空穴对把光功率转换成光电流。常用的光电二极管为 PIN 光电二极管和雪崩光电二极管(APD-Avalanche Photo Diode),后者有放大作用。在短波长采用 Si(硅)材料,在长波长用 Ge(锗)或 InGaAsP 材料。

在光端机中除光频半导体二极管外,都是电子电路。在发送端保证信号按要求的指标对半导体光源进行调制;而在接收端能把光电二极管检测出的弱电信号不失真地进行放大,还原为原来的信号。所以除光器件之外,光端机基本上是由功率放大器,低噪声放大器,编码,整形等电路构成,与电通信所用的技术相同,只不过在大容量光纤通信系统中要求系统的频带宽,脉冲窄罢了。

2-2 光纤通信发展概况

光纤通信经过二十年的发展,已有三代光纤通信系统由试验研究进入实用阶段。

第一代光纤通信系统于70年代后期进入商用。其工作波长在 $\lambda = 0.85\mu\text{m}$ 短波长波段。光源采用AlGaAs半导体激光器或发光二极管,光电检测器为Si材料PIN光电二极管或雪崩光电二极管。传输媒质为多模光纤,其衰减系数约为 $2.5\sim 4\text{dB/km}$ 。系统容量为三次群(注:系统基群码速率:2Mbit/s;二次群:8Mbit/s;三次群:34Mbit/s;四次群:140Mbit/s;五次群:565Mbit/s)以下,无中继传输距离在10km以内。

第二代光纤通信系统工作于 $\lambda = 1.3\mu\text{m}$ 长波长波段。该波段是石英系光纤的第二个低损耗窗口,有较低的损耗且有最低的色散。在这一时期光纤由多模光纤发展到单模光纤。单模光纤与多模光纤相比,色散更低,损耗也更小。

要开拓 $\lambda = 1.3\mu\text{m}$ 这一波段,必须研制相应波长的光源和光电探测器。InGaAsP长波长激光器和Ge光电探测器是第二代光纤通信技术的标志。

第二代光纤通信系统在80年代中期投入使用,可容纳四次群,无中继传输距离在50km左右。

第三代光纤通信系统工作于 $\lambda = 1.55\mu\text{m}$ 长波长波段。其所用光源与光电检测器与第二代光纤通信系统相同,仍用InGaAsP半导体激光器和Ge光电探测器。传输媒质为单模光纤。该波段是石英系光纤的最低损耗窗口。但色散却较 $\lambda = 1.3\mu\text{m}$ 处大。为了克服这一缺点以扩大通信容量和延长通信距离,可采用两种方法:一是采用色散频移光纤将光纤的低色散区移至 $\lambda = 1.55\mu\text{m}$ 处,一是采用单纵模激光器以减小光纤色散的影响。

第三代光纤通信系统于80年代中期研制成功,现正大力敷设,开发,应用,还在不断发展。其传输速率为五次群或更高,无中继