

光纤通信原理

袁松青 刘海平 刘敏肖 编



人民邮电出版社

光纤通信原理

袁松青 刘海平 刘敏肖 编

人民邮电出版社

内 容 提 要

本书详细介绍光纤、光导体光器件的基本原理及特性,光端机及光纤通信系统的组成,并简要介绍光纤通信的测量方法,最后对光纤通信的未来作了展望。

该书内容全面,注重理论联系实际;叙述通俗易懂,没有繁琐的数学推导;每章前后有内容提要和小结,每节后有复习思考题,适合读者自学。

本书可作为邮电中等函授教材及从事光纤通信技术人员的学习参考书和培训教材。

光 纤 通 信 原 理

◆ 编 袁松青 刘海平 刘敏肖

责任编辑 陈 涛

◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市崇文区夕照寺街14号

北京朝阳隆昌印刷厂印刷

新华书店总店北京发行所经销

◆ 开本:787×1092 1/32

印张:12

字数:273千字

1998年8月第1版

印数:1-5000册

1998年8月北京第1次印刷

ISBN 7-115-07166-7/TN·1380

定价:18.00元

编者的话

《光纤通信原理》可作为邮电中等函授光纤通信专业的专业基础课以及从事光纤通信技术人员的培训教材和自学参考书。通过本书的学习,读者将掌握光纤通信的基本原理和光纤数字通信系统的组成,了解光纤通信的未来与发展,为进一步学习光纤通信技术和设备打下基础。

全书共分七章。其中第一章介绍光纤通信的基本概念及发展;第二章介绍光纤导光机理及传输特性;第三章介绍光器件的工作原理及特性;第四章介绍光端机及光中继器组成;第五章介绍光纤通信系统的类型、构成及设计原理;第六章介绍光纤通信的测量;最后一章对光纤通信的新技术作了简要介绍。非光纤通信专业教学可根据专业需求选学其中章节。

本书在编写过程中,充分考虑到邮电中函教育和职工技术培训的特点,内容完整且联系实际,叙述时详尽通俗,尽可能避免繁琐的数学推导,每节后附有复习思考题,适合函授生自学;每章前的内容摘要和每章后的小结,有助于学生抓住重点、理解难点。

本书的第一、五、六、七章由袁松青编写,第三、四章由刘海平编写,第二章由刘敏肖编写。全书由袁松青统编。

在本书编写过程中,得到了邮电中函教学指导组的热情关怀;在初稿写出后,评审专家们提出了许多宝贵的修改意见,使本教材得到了进一步的完善。在此对他们表示诚挚的谢意。

由于作者水平所限,再加上编写时间仓促,书中不足之处在所难免,敬请专家同行及读者批评指正。

作者
1998年6月

目 录

第一章 光纤通信概述	1
第一节 光通信的发展史	1
思考题与习题	5
第二节 光纤通信的基本概念和特点	6
一、光纤通信的光波波段	6
二、光纤通信的基本组成	6
三、光纤通信的优点	8
思考题与习题	10
第三节 光纤通信展望	10
思考题与习题	13
本章小结	14
第二章 光纤与光缆	15
第一节 光纤的结构和种类	16
一、光纤的结构	16
二、光纤的种类	17
思考题与习题	20
第二节 光纤的导光原理	20
一、射线光学基础的基本定律	21
二、阶跃型光纤光射线的理论分析	23
三、渐变型光纤光射线的理论分析	27
四、光纤中传播的模式	31
五、光纤中传输功率分配	38

思考题与习题	39
第三节 单模光纤	40
一、单模光纤的折射率分布	40
二、单模光纤的单模工作条件	42
三、单模光纤的特性参数	43
四、单模光纤的偏振	45
思考题与习题	47
第四节 光纤的损耗特性	47
一、吸收损耗	48
二、散射损耗	51
三、其它损耗	53
四、光纤的损耗特性曲线	54
思考题与习题	55
第五节 光纤的色散特性	55
一、光纤色散的概念	56
二、光纤色散的表示方法	56
三、光纤色散的种类	56
四、光纤的传输带宽	66
思考题与习题	68
第六节 光纤的制造工艺简介和光纤的接续	70
一、光纤的制造工艺简介	70
二、光纤的接续	74
思考题与习题	80
第七节 光缆的结构和种类	80
一、光缆的基本结构	80
二、光缆的种类	82
思考题与习题	84

本章小结	84
第三章 光纤通信器件	87
第一节 光源	88
一、发光机理	89
二、激光器的工作原理	91
三、半导体激光器(LD)	94
四、半导体发光二极管(LED)	111
五、半导体发光器件的简易测试	114
六、光源与光纤的耦合	115
思考题与习题	118
第二节 半导体光电检测器	119
一、半导体光检测器的工作原理	120
二、PIN 光电二极管	120
三、雪崩光电二极管(APD)	122
四、光电检测器的特性	124
五、光电检测器的简易测试	130
思考题与习题	131
第三节 无源光器件	131
一、光纤连接器	132
二、光分路耦合器	135
三、波分复用器	137
四、光隔离器	139
五、光开关	140
思考题与习题	142
本章小结	142
第四章 光端机和光中继器	145
第一节 光发送机	146

一、光发送电路的组成	147
二、光源的调制与驱动	148
三、控制电路	158
思考题与习题	165
第二节 光接收机	165
一、光接收机的组成	166
二、线性通道	167
三、光接收机的主要指标	172
四、光接收机的噪声对灵敏度的影响	173
思考题与习题	181
第三节 光中继器	182
一、光中继器的构成	182
二、判决再生电路	183
思考题与习题	190
本章小结	190
第五章 光纤数字通信系统	193
第一节 光纤通信系统的分类与组成	194
一、光纤通信系统的类型	194
二、光纤数字通信系统的组成	199
思考题与习题	202
第二节 光纤数字通信系统的性能指标	203
一、数字传输模型	203
二、误码率	205
三、抖动	215
四、可靠性与可用性	218
思考题与习题	219
第三节 光纤通信系统的辅助系统	220

一、监控管理系统	220
二、公务通信系统	223
三、区间通信系统	225
四、自动倒换系统	228
五、辅助信号的传输方式	230
思考题与习题	232
第四节 光纤线路码型	232
一、对光纤线路码型的要求	233
二、常用光纤线路码型	234
三、线路码的编译码电路	242
四、误码检测方法	246
思考题与习题	249
第五节 光纤通信的同步数字系列简介	250
一、PDH 系列光纤通信及其缺点	250
二、同步数字系列(SDH)	255
三、网络拓扑与自愈网	264
思考题与习题	270
第六节 光纤数字通信系统的设计原理	271
一、光纤通信系统的总体设计	272
二、光中继段的工程计算	279
思考题与习题	285
本章小结	286
第六章 光纤通信测量	289
第一节 光纤的测量	289
一、光纤测量概述	290
二、光纤衰减特性的测量	298
三、光纤色散和带宽的测量	304

思考题与习题	308
第二节 光系统的测试	308
一、光端机光口指标的测试	309
二、光纤通信系统全程特性测试	313
思考题与习题	317
第三节 光纤数字通信工程及维护常用仪表	318
一、光衰减器	318
二、光源	319
三、光功率计	320
四、光纤熔接机	321
五、光时域反射仪	324
六、数字传输分析仪	326
思考题与习题	331
本章小结	331
第七章 光纤通信新技术	333
第一节 光纤接入网	334
一、接入网的基本概念	334
二、光纤接入网	337
思考题与习题	341
第二节 相干光通信	341
一、相干光通信的工作原理	342
二、光调制方式	342
三、相干光通信关键的技术问题	344
四、相干光通信的优点	345
思考题与习题	346
第三节 光复用技术	346
一、光时分复用(OTDM)	347

二、波分复用(WDM)	348
三、频分复用	351
思考题与习题	354
第四节 微波副载波复用(SCM)	355
一、微波副载波复用基本原理及系统构成	356
二、SCM系统的电调制方式	357
三、SCM系统的特点	358
四、应用举例	359
思考题与习题	360
第五节 全光传输	360
一、超长波长光纤通信	361
二、光放大器	364
三、光孤子通信	369
思考题与习题	370
本章小结	371

第一章 光纤通信概述

内容与要求

光纤是光导纤维的简称。光纤通信是将要传送的电报、电话、图像和数据信号调制在光载波上,以光纤作为传输媒介的通信方式。光纤通信是本世纪 70 年代初开始起步的,由于其具有传输频带宽、损耗小等特性,近 20 年来发展迅猛,现已在长途干线网中逐步代替同轴电缆、微波等而成为主要传输手段。可以预计,光纤通信将进入用户网,逐步取代用户网中的音频电缆,从而走进千家万户。

本章将简要介绍光纤通信的基本概念及其发展过程,分析光纤通信的特点,并对光纤通信的未来进行展望。通过本章学习,要求:

1. 了解光通信的发展史;
2. 掌握光纤通信系统组成及光纤通信的优点;
3. 熟悉光纤通信的发展动向。

第一节 光通信的发展史

光通信的历史可以追溯到古代的烽火通信,以及现在还在

使用的交通信号和水上交通用的“旗语”等,在这些通信方式中,光信号本身即是信息。现在的光通信则有本质不同,它是以光波作为载波,即将信息调制在光载波上的通信方式。光波是一种电磁波,电磁波的波谱图如图 1-1-1 所示。从图中可见,电磁波频率由低到高,包括音频、长波、中波、短波、微波、光波、X 射线,γ 射线等。无论是有线通信还是无线通信,都是将低频信息(如音频或视频)调制搬移到高频载波上;载波频率越高,其所在频段频带越宽,通信容量越大,所以通信载频由低到高发展,先后经历了长波、中波、短波、微波等无线电波的各个波段。光波频率很高(约 10^{14} 数量级),其通信频带是无线电波(包括长波、中波、短波、微波)频带总和的 $10^1 \sim 10^4$ 倍。因此,对通信频率资源不断开发利用的结果,人们自然想到利用光波作为载波载荷传输信息,因为光通信的传输容量是惊人的。

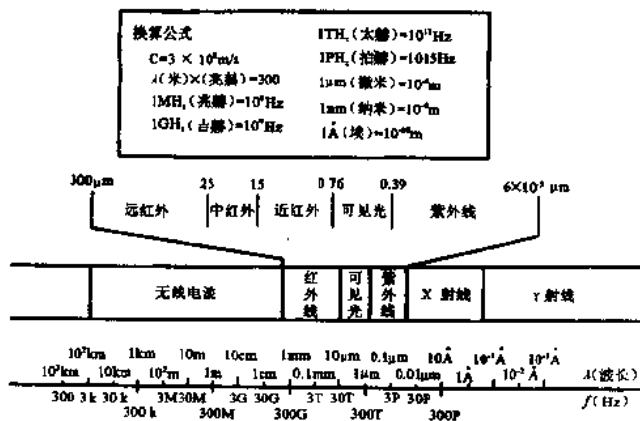


图 1-1-1 电磁波谱

光通信的发展主要碰到光源、光传输媒介和光电检测器等技术障碍。早在 1880 年,美国的贝尔发明了光学电话,他以日

光作为光源,采用话筒的薄膜随着声音的振动而振动来实现声光调制,其做法是将日光发出的恒定光束投射到受声音控制的薄膜上,这样从薄膜上反射回来的光束强弱变化就携带了声音信息;然后这束被调制的光信号经大气传送到接收端。接收端采用一个大型抛物面反射镜和一个硅光电池组成光电检测器,光电池接收到由反射镜反射来的携带有信息的光信号后,就转换成光电流,再把光电流送给听筒而发声,从而完成了光电话通信,这种光电话通信距离达到 207 米。但是就此之后直到 1960 年以前,光通信的发展却几乎停滞不前,这主要是由于日光等光源为非相干光,它的方向性不好,不易调制和传输;以空气作为传输媒介,损耗很大,无法实现远距离传输,而且通信也极不稳定可靠;硅光电池作为光电检测器,内部噪声很大,通信质量很差。

1960 年,美国梅曼(Maiman)发明了红宝石激光器,它发出的是一种谱线很窄、方向性很好、频率和相位一致的相干光,易于调制和传输,它的发明解决了光源方面的障碍,加速了光通信的研究和发展。

1961~1970 年,人们主要研究利用大气传输光信号,但实践证明,它受到了气候的严重影响,无法实现正常的通信。为此,人们又考虑了各种传输介质,其中包括利用玻璃材料制成光导纤维来传输光信号,但是普通的玻璃材料损耗在 1000dB/km 以上,因而传输距离很有限。直到 1966 年,英籍华人高锟(K. C. Kao)博士提出普通的二氧化硅(SiO_2)玻璃损耗大的原因是由于其中的杂质造成的,经过提纯后,可实现损耗为 20dB/km 的光纤。依据高锟博士的理论,1970 年,美国康宁玻璃公司研制成功了损耗为 20dB/km 的光纤,终于使利用光纤远距离传输光信号成为了可能。1974 年,该公司又把损耗降到了 2dB/km。

1980年,光纤损耗进一步降低到了 0.2dB/km ,已接近石英系光纤理论损耗的极限。另外,要实现大容量的通信,还要求光纤带宽很大;单模光纤带宽最宽,是理想的传输介质,因此最早人们考虑采用单模光纤,但单模光纤纤芯直径很细,一般为几个微米,所以工艺要求很高,这在70年代初是难于达到的,因此,当时大多研究纤芯直径较大的多模光纤。但是多模光纤中传播的光的各个模式间存在光程差,造成光纤有较大的色散,即多模光纤的带宽较窄。直到1976年,日本研制出渐变型光纤,又称自聚焦光纤,大大地改善了光纤的带宽,可达 $1000\text{MHz}\cdot\text{km}$ 。在80年代,由于光纤制作工艺的进步,单模光纤也研制成功,其传输带宽达到几十千兆至数百千兆赫·公里,这一成果标志着超大容量的光纤通信成为了可能。

光纤通信的实现需要有适当的光源。红宝石激光器发出的光束不容易耦合进光纤中传输,其耦合效率是极低的,因此需要研制小型化的激光光源。1962年研制成功的镓铝砷(GaAlAs)注入式半导体激光器发光波长为 $0.85\mu\text{m}$,尽管其当时无法在室温下运行,寿命很短,但是由于它的发光波长与70年代初光纤的低衰减窗口是相吻合的,而且半导体光源体积小,易于与光纤耦合,因而成了研究的重点。经过不懈的努力,1970年终于研制成功了室温下连续运行的 GaAlAs 双异质结注入式激光器。与此同时, GaAlAs 发光二极管也制造成功。发光二极管寿命长,但速率较低,功率小,谱线宽,属于非相干光源。随着工艺的进步,短波长($0.85\mu\text{m}$) GaAlAs 激光器的寿命已可达几十万小时。为了配合光纤的长波长窗口($1.3\mu\text{m}$ 和 $1.55\mu\text{m}$),铟镓砷磷(In-GaAsP)半导体材料的长波长激光器和发光二极管也相继研制成功。

与此同时,光电检测器也相应地得到了发展,适用于短波长

的半导体光电检测器如硅光二极管(Si-PIN)和硅雪崩光电二极管(Si-APD)以及适用于长波长的 InGaAsP/InP、Ge 光电二极管(PIN)和雪崩光电二极管(APD)也相继研制成功。

这样,光通信的难题相继解决,光纤通信的研究在世界范围内展开并迅猛发展。1976年后,各种实用的光纤通信系统陆续出现,美国首先在亚特兰大安装了商用系统,其码速率为44Mbit/s,传输距离为10km左右。到了80年代之后,世界上许多国家都研制成功了商用的光纤通信系统,短波长波段($0.85\mu\text{m}$),码速率一般在140Mbit/s以下,采用多模光纤,传输距离10km左右;长波长波段($1.3\mu\text{m}$),码速率通常在几百Mbit/s至几Gbit/s,采用多模光纤或单模光纤,传输距离达30km以上。这些系统的性能已经达到和超过了原有的电缆系统性能。光纤通信系统通信容量大、传输距离远的优越性已经充分体现出来。

因此,80年代中后期以来由于光纤通信的优越性,世界各国纷纷宣布本国的长途通信系统将不再建设电缆线路,而代之以光纤光缆线路,光纤通信得到了飞速的发展。

思考题与习题

1-1-1 为什么要发展光通信?

1-1-2 光通信发展的主要障碍是什么?在光纤通信中,这些障碍是如何被解决的?

1-1-3 什么是相干光?它有什么特点?为什么日光等光源无法作为光通信的光源?