



全国高等教育自学考试

光纤通信原理 自学辅导

全国高等教育自学考试指导委员会 组编
叶险峰 编著

浙江大學出版社

Q · G · G · J · Y · Z · X · K · S

出版前言

为了完善高等教育自学考试教育形式,促进高等教育自学考试的发展,我们组织编写了全国高等教育自学考试自学辅导书。

自学辅导书以全国考委公布的课程自学考试大纲为依据,以全国统编自考教材为蓝本,旨在帮助自学者达到学习目标,顺利通过国家考试。

自学辅导书是高等教育自学考试教育媒体的重要组成部分,我们将根据专业的开考情况和考生的实际需要,陆续组织编写、出版文字、音像等多种自学媒体,由此构成与大纲、教材相配套的、完整的自学媒体系统。

全国高等教育自学考试指导委员会

1999年10月

目 录

第1章 概述	1
1.1 重点和难点讲解	2
1.1.1 光纤通信的特性	2
1.1.2 光通信系统	4
1.1.3 光纤通信系统	5
1.1.4 强度调制和直接检测	6
1.1.5 光通信史话	7
1.1.6 光通信技术的发展	9
第2章 介质薄膜波导	12
2.1 概述	12
2.2 重点和难点讲解	12
2.2.1 薄膜介质波导	12
2.2.2 薄膜波导特征方程的物理意义	14
2.2.3 模式	14
2.2.4 导波模式	15
2.2.5 波导的截止波长和单模传输条件	16
2.3 典型例题	16
第3章 光导纤维与光缆	19
3.1 概述	19
3.2 重点和难点讲解	19

3.2.1	光纤结构和折射率分布	19
3.2.2	数值孔径	19
3.2.3	子午射线和斜射线	21
3.2.4	光纤色散	23
3.2.5	光纤色散的表示方法	24
3.2.6	光纤色散的种类	24
3.2.7	模式色散	24
3.2.8	材料色散	25
3.2.9	波导色散	26
3.2.10	三种色散的比较	27
3.2.11	光纤的损耗特性	28
3.2.12	单模光纤	29
3.2.13	单模光纤单模传输条件	29
3.2.14	截止波长	29
3.2.15	模场直径	30
3.2.16	单模光纤的双折射特性	31
3.3	典型例题	31
第4章	光源和光发射机	35
4.1	概述	35
4.2	重点和难点讲解	35
4.2.1	半导体的能带结构	35
4.2.2	费米能级	36
4.2.3	半导体 P-N 结	37
4.2.4	半导体的自发发射和受激发射	39
4.2.5	半导体激光器形成激光的条件	40
4.2.6	单异质结构	40
4.2.7	双异质结构	43
4.2.8	谐振条件和谐振频率	45

4.2.9 半导体激光器的输出光谱	46
4.2.10 半导体激光器横模和纵模的概念	46
4.2.11 激光器的温度特性	47
4.2.12 半导体发光二极管和半导体激光二极管	48
4.2.13 直接调制和间接调制	49
4.2.14 电光效应和声光效应	50
4.2.15 声光调制器	51
4.2.16 电光调制器	52
4.2.17 模拟调制和数字调制	53
4.3 典型例题	55
第5章 光电检测器和光接收机	56
5.1 概述	56
5.2 重点和难点讲解	57
5.2.1 光检测器的物理基础	57
5.2.2 PN 光电二极管	59
5.2.3 PIN 光电二极管	59
5.2.4 雪崩光电二极管	60
5.2.5 响应度和量子效率	61
5.2.6 光电二极管的噪声	62
5.2.7 APD 的噪声	63
5.2.8 光接收机的接收灵敏度	64
5.2.9 光接收机动态范围	65
5.2.10 集成光接收机	66
5.3 典型例题	66
第6章 光纤通信系统	70
6.1 概述	70
6.2 重点和难点讲解	70
6.2.1 线路码型	70

6.2.2 系统设计考虑	73
6.2.3 光中继器	74
6.2.4 光隔离器	75
6.2.5 光隔离器的应用	77
6.2.6 光中继段的工程计算	78
6.2.7 带宽特性	79
6.2.8 假设参考连接	81
6.2.9 误码性能	82
6.2.10 抖动性能	84
6.3 典型例题	85
第7章 同步数字系列	89
7.1 概述	89
7.2 重点和难点讲解	90
7.2.1 PDH 和 SDH 的比较	90
7.2.2 SDH 的速率	91
7.2.3 SDH 的帧结构	91
7.2.4 SDH 的复用	93
7.2.5 SDH 传输网的分层模型	96
7.2.6 SDH 信息模块归类	97
7.2.7 SDH 系统	98
第8章 光放大器	100
8.1 概述	100
8.2 重点和难点讲解	101
8.2.1 光放大器的优点	101
8.2.2 半导体光放大器和光纤放大器	101
8.2.3 掺铒光纤放大器的结构	103
8.2.4 掺铒光纤放大器的工作原理	105
8.2.5 EDFA 的应用	106

8.3 典型例题	109
第9章 现代光纤通信技术介绍	110
9.1 概述	110
9.2 重点和难点讲解	110
9.2.1 波分复用系统	110
9.2.2 相干光通信系统	114
9.2.3 光孤子系统	116
9.2.4 全光通信网	118
第10章 光纤及光纤通信系统的测量	120
10.1 概述	120
10.2 重点和难点讲解	120
10.2.1 平均发送光功率的测量	120
10.2.2 消光比 EXT 的测量	121
10.2.3 接收灵敏度的测量	121
10.2.4 动态范围的测量	122
10.2.5 色散的测量	123
10.2.6 时域法和频域法的比较	123
10.2.7 背向散射法	124
10.2.8 背向散射法的工作原理	124
参考书目	129
后 记	131

第 1 章 概 述

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 20 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 多年来发展迅猛,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。

光纤通信技术凝聚了各类专业专家的研究成果。如图 1-1 所示,材料专家研制出了新的人造材料;器件物理学家使用这些材料研制成了光电器件,如激光器和光电二极管等;系统设计专家研制出了采用光电器件的子系统和系统,例如发射机和接收机;网络专

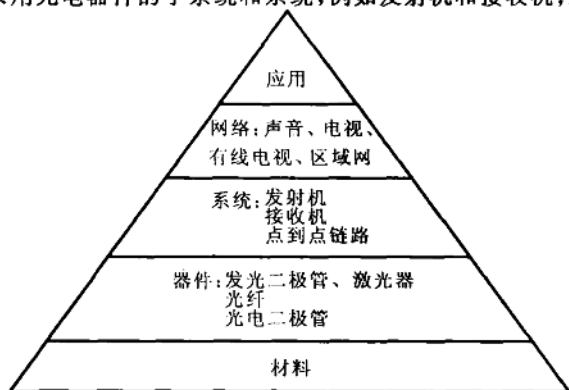


图 1-1 光纤通信金字塔

家采用这些系统构成了网络;最后设计出了一些利用网络的实际应用,例如电话和电视会议。

在本章的学习中,应主要注重光纤通信的整体宏观把握,重点掌握以下知识点:

光通信、光纤通信、强度调制和直接检测。

1.1 重点和难点讲解

1.1.1 光纤通信的特性

光纤通信之所以能够飞速发展,是由于它具有以下的突出优点:

(1) 传输频带宽,通信容量大

由于光波频率很高,可以利用的频带很宽,尤其适合高速宽带信息的传输,因此在高速通信干线以及宽带综合服务通信网络中,更能发挥作用。因为通信容量和载波频率成正比,而光纤传输的光载波比传统电通信频率高 10^4 倍以上,所以光纤通信的通信容量在理论上比电通信容量大数万倍以上,目前实际水平已经达到几十倍。例如,现在已大量投入使用的 2.5Gbit/s 数字光纤通信系统,在一根光纤上可同时传输 3 万多路电话,而以前电通信中容量最大的中同轴电缆,仅能同时传输 1000 多路电话。

(2) 损耗小,中继距离长

由于光纤传输损耗低(在 $1.55\mu\text{m}$ 波长处,光纤损耗只有 0.2dB/km),所以中继距离达到几十公里,甚至成百上千公里,而传统的电传输线中继距离仅为几公里,因而可以大大增加通信距离。这对长途干线通信、海底光缆通信十分有利。在采用先进的相干通信技术、光放大技术和光孤子通信技术之后,通信距离可提高到几百公里甚至上千公里。

(3) 无电磁干扰,不会产生串光

光纤是非金属材料,它不受电磁干扰,这是传统的电通信无法比拟的,因此光纤通信在电力输配、电气化铁路、核试验等特殊环境的通信中具有显著的优越性。光纤也没有发生电火花的安全,因此,由于光信号束缚在纤芯内传播,所以不会产生光纤间的串光现象,这给同一光缆中不同光纤间光信号的传播质量及光缆中光纤的高密度布放等带来了很好的保证与方便。

(4)尺寸小,重量轻

光纤直径仅 0.1mm 左右,因而制成光缆以后,直径比电缆细,重量也轻很多,这给工程应用带来极大便利,便于敷设和架设。

(5)原材料十分丰富,节省宝贵的金属材料

光纤的主要成分是二氧化硅(SiO_2),这是地球组成最主要的成分之一,因而制作光纤的原材料是非常丰富的,可以说是取之不尽,用之不竭。同传统的电传输线相比,光纤传输媒介在通信中的广泛应用节省了大量越来越宝贵的金属材料。

(6)保密性强

光纤内传播的光能几乎不会向外辐射,因此光信号很难被窃听,也不存在光缆中各根光纤之间的信号串扰。

(7)均衡措施简单

在运用频带内,光纤对每一频率成分的损耗几乎是一样的,因此在中继站和接收端只须采取简单的均衡措施,甚至可以不加任何均衡措施。

(8)无电位差和接地的问题

光纤是电的绝缘体,因此通信线路的输入端和输出端是电绝缘的,这就没有电位差和接地的问题。

与此同时,光纤通信也存在以下一些缺点:

- 1) 光纤弯曲半径不能过小。
- 2) 光纤的切断和连接操作技术复杂。

3)分路、耦合麻烦。

表 1-1 列出了光纤与几种电通信传输介质的特性比较。

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(4 MHz)	1~2	方便	方便
同轴电缆	400	19(60 MHz)	1.6	方便	方便
微波波导	40~120	2	10	特殊	特殊
光纤光缆	>10GHz	0.2~3	>50	方便	特殊

由于光纤具备一系列优点,所以广泛应用于公用通信、有线电视图像传输、计算机、航空航天、船舰内的通信控制、电力及铁道通信、交通控制信号、核电站通信、油田、炼油厂、矿井等领域内的通信。

1.1.2 光通信系统

任何通信系统的目的都是把信息从一点传送到另外一点。完成这种信息的传送,最常用的办法是把信息先附加(调制)在一个电磁波(载波)上,然后把被调制的载波发送(传播)到目的地;在目的地接收到电磁波后,再把信息复原(解调)。这样的系统通常是以载波频率在电磁波频率谱的位置加以区分的(见教材图 1-1)。无线电通信系统中电磁载波是从射频(RF)波段中选择一个频率。微波和毫米波系统的载波频率是教材图 1-1 中标明的微波和毫米波的频段。对于光通信系统,载波是从光区段中选择,包括红外光、可见光和紫外光频率。

在光频率段进行通信的显著优点是调制带宽可以显著增大。对于任何通信系统,传输的信息量大小直接和载波的调制带宽有关。通常,调制带宽只是载波频率的一个固定百分比,增加载波频

率理论上可以增大可利用的传输带宽,因此也就增加了整个系统的通信容量。这意味着在光波频率段所具有的可利用带宽大约是无无线电射频波段的 10^4 倍。当传输大容量信息时,光波传输无疑具有巨大吸引力。

图 1-2 为光通信系统的典型框图。图中所包含的各个标准通信模块在任何光通信系统中都是适用的。数据源所产生的某种形式的信息(随时间变化的波形、数字系统等)将被传送到远端的某个目的地。这个源的输出被调制到一个光载波上(载波频率为电磁波谱的光波部分),光载波以光场或光束的形式通过光通道(自由空间、湍流大气层、光纤波导等)进行传输。在接收端,光场被收集和处理(光检测)。通常,检测时会伴有噪声干扰、信号变形、内存背景辐射(无用的光场或其他电磁辐射)。上述系统中传输载波是光波频段,系统的工作方式与其他采用调制方式的通信系统是相同的。

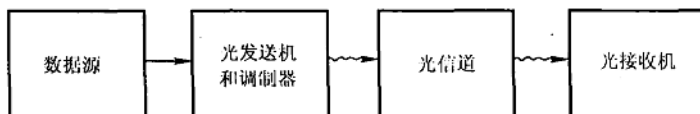


图 1-2 光通信系统框图

1.1.3 光纤通信系统

若光通信系统中的光信道采用的是光纤,系统便成为光纤通信系统。光纤通信系统中电端机的作用是对光源(如激光器或发光二极管)进行调制,使电信号调制成光信号,输入光纤传输到远方;接收端的光端机内有光检测器(如光电二极管),它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,输到电端机的接收端。长距离的光纤通信系统还需中继器,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。目前的中继器多采用光-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转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变得为期不远。

1.1.4 强度调制和直接检测

把信号源的信息调制到光载频上可以采用不同的方式。强度调制是用待传输的信息去调制光载波的强度。光接收机可以分为两种基本类型:一种是直接检测或非相干接收机;另一种是外差或空间相干接收机。直接检测接收机的工作方式是最简单的一种,只要传输的信息体现在接收光场的功率变化之中,就可以采用这种接收机。

实际上,当前采用的所有光纤通信系统基本是使用强度调制(IM)和直接检测(DD)方法,即强度调制和直接检测(IM-DD)系统。

图 1-3 画出了基本 IM-DD 系统示意图。它包括一个激光器或发光二极管(LED)光源、光纤及 PIN 或雪崩光电二极管(APD)光接收机。当前大多数光系统是数字系统。一个高性能的数字系统可以传输数 Gbit/s 光信号通过较长的无中继距离。这样一套系统通常采用单模单频激光器、单模光纤及 PIN 接收机。

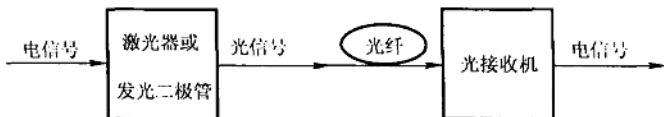


图 1-3 基本的光纤 IM-DD 通信系统

当传输距离较短及比特率较低时,系统可采用 LED 和多模光纤。虽然在电信网络中不再使用这种类型的系统,但它们可用于计算机互连、车内通信及其他类似的短途通信。

还有一类是在 20 世纪 80 年代后期和 90 年代初期发展起来的 IM/DD 模拟系统。这些系统载有供有线电视和天线遥控使用的模拟信号。

1.1.5 光通信史话

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,利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拾取声音信息;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带有信息的光信号后,就转换成光电流,再把光电流送到听筒而使其发声,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,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,人们又在考虑各种传输介质,其中包括利用玻璃材料制成光导纤维来传输,但传输距离很有限。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,可制造出损耗为 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,从而使利用光纤远距离传输光信号出现了曙光。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;由于单模光纤带宽最宽,是理想的传输介质,因此最早人们考虑采用单模光纤。但是,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 20 世纪 70 年代是难以达到的。当时大多研究仅局限于纤芯较大的多模光纤。由于这种阶跃折射率的多模光纤传播的光在各个模式间存在光程差,造成光纤有较大的色散,因而发展了多模渐变折射率光纤。多模渐变折射率光纤大大地改善了光纤的带宽,可达 $1000\text{MHz} \cdot \text{km}$ 。在 20 世纪 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赫·公里至数百千兆赫·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,其耦合效率是极低的,不容易耦合进光纤中传输,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 $0.85\mu\text{m}$,尽管当时无法在室温下运行,寿命很短,可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 年终于研制成功了可在室温下连续运行的 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。这种发光二极管寿命较长,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(InGaAsP)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,光通信的难题相继得到解决,光纤通信的研究在世界范围内展开并迅猛发展。1976年后,各种类型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,其码速为 44Mbit/s,传输距离为 10km 左右。到了 20 世纪 80 年代,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或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。

1.1.6 光通信技术的发展

光纤通信经过 20 多年的发展,已有四代光纤通信技术得到了应用。

第一代光纤通信系统的工作波长 $\lambda_0 = 0.85\mu\text{m}$,属短波长波段,传输用多模光纤。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。这一代光通信以 1977 年美国芝加哥进行的码速为 44.736Mbit/s 的现场实验为标志。

第二代光纤通信系统的工作波长为 $\lambda_0 = 1.3\mu\text{m}$,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技术。单模光纤较多模光纤色散低得多,损耗也更小。这一代光纤通信广泛地应用于长途干线和跨洋通信中。

80 年代中后期又实现了 $\lambda_0=1.55\mu\text{m}$ 单模光纤通信系统,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。

光纤通信发展史上的一个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做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,其意义可与当年由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,把光通信推向了一个新的阶段。掺铒光纤放大器的泵浦源的 $0.98\mu\text{m}$ 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,引起了光通信的革命性进步。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