

光纤通信是以光波为携带信息的载波,以光导纤维(Optical Fiber,简称光纤)为传输媒介实现信息传输的一种通信方式。自 20 世纪 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由实验阶段进入实用阶段,随即广泛地应用于各通信产业,其发展速度和应用规模是其他通信方式所无法比拟的,现在光纤通信已成为所有大容量、高速率通信系统的最佳技术选择。

目前,无论是电信骨干网还是用户接入网,无论是陆地通信网还是海底光缆网,都用到光纤通信。生活中,看电视、打电话、上网等的信息传输,也都离不开光纤通信。光纤通信已经广泛应用到通信、广播、电视、电力、医疗卫生、测量、自动控制、航天、商业专用网等诸多领域,几乎是无处不在,无时不用。美、日、英、法等 20 多个国家和地区已宣布不再建设电缆通信线路,而致力于发展光纤通信。

本章将对通信系统的基本概念、光纤通信的基本知识、光纤的结构和信号传输、光纤通信系统的功能模块、光纤通信网络等内容进行简单介绍。

3.1 通信系统的基本概念

1. 通信系统的基本组成

在日常的工作和生活中,我们每天都要接触和使用大量的现代通信系统和通信媒介,例如,最常见的用手机打电话、网上购物、交流信息、看电视、听广播等。通信系统的作用,是将形成消息的信源信息发送到一个或多个目的地,消息的形式可以是符号、文字、语音、音乐、图片、活动图像等。实际上,基本的点对点通信,都是将发送端的消息通过某种信道传递到接收端。一般情况下,通信系统可以用图 3.1 所示的模型加以概括。

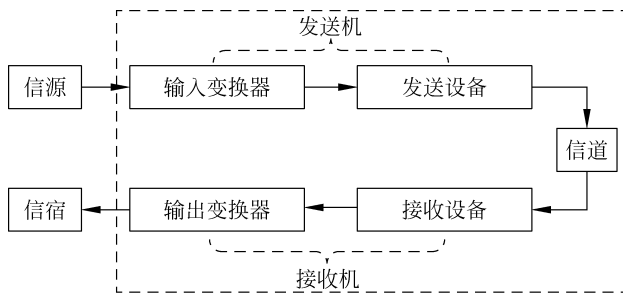


图 3.1 通信系统的基本组成

由图 3.1 可以看出,通信系统的核心由三个部分构成,即发送机、信道和接收机。以更广为熟知的电通信系统为例,介绍通信系统这三个基本组成部分的功能。

(1) 发送机

发送机包括输入变换器和发送设备两部分。输入变换器通常用于将信源的输出消息变换成原始电信号(或称为消息信号),例如,用作变换器的话筒可以将语音信号变换为电信号,而摄像机则将图像信号变换为电信号。发送设备将原始电信号变换成适合在信道中传输的形式,再送入信道中进行传输。例如,在无线电和电视广播中,美国联邦通信委员会(FCC)指定了各个发射台的频率范围,因此发送设备必须将原始电信号转换到合适的频率范围去发送,以便与分配给此发送机的频率相匹配,从而由多个无线电台发送的信号就不会彼此干扰。

(2) 信道

信道是指信号传输的通道,是一种物理介质,用于将来自发送机的信号发送到接收机。在无线传输中,信道通常是大气层(自由空间);在光纤通信中,信道是光纤(光缆)。而一个通信过程可能会用到多种信道,例如打电话时,可能用到多种物理介质,包括自由空间、电线、光缆等。

(3) 接收机

接收机包括接收设备和输出变换器两部分,接收设备从接收信号中恢复出相应的消息信号,送到输出变换器变换成适合信宿的形式,使得信宿得到要传递的信息。

上述内容概括地反映了通信系统的功能,而实际的通信系统还需要考虑很多的问题。例如,发送机需要通过调制过程,实现消息信号与信道上载波信号的匹配,通常调制是使用消息信号来系统地控制改变载波的振幅、频率或相位分量,形成载波信号,这三种调制方式即为幅度调制(AM)、频率调制(FM)、相位调制(PM)。再如,信号在信道中传输时,会伴有一定的噪声引入、功率衰减、色散等现象,这些都会引起传输信号质量的恶化,降低通信系统的性能。噪声是如何产生的?信号功率衰减、色散是由哪些因素引起的?现代通信系统中有什么解决方案应对这些信号恶化?这些与通信系统相关的内容都可以在《通信原理》专业课上得到更深入的答案,这里不再赘述。

2. 模拟信号和数字信号

数字时代、数字电视,这些词语大家耳熟能详,其中的“数字”即是现代通信系统中应用最为广泛的一种信号形式。通信传输的消息是多种多样的,大致上可以分为两类:一类称为离散消息,也叫作数字消息,是指消息的状态是可数的或者离散的,比如符号、文字、数据等;另一类称为连续消息,也叫作模拟消息,是指其状态连续变化的消息,比如图像、连续变化的语音、曲线等。

由图 3.1 的通信过程可知,消息和信号之间必须建立单一的对应关系,将信号送到通信系统中发送、传输、接收,才能复制出原来的消息。通常,消息被载荷在信号的某一参量上,如果信号参量携带着离散消息,则该参量必然是离散取值的,这种参量取值在时间上不连续、离散的信号,称为数字信号。如果信号的参量连续取值,则称其为模拟信号。按照信道中传输的是模拟信号还是数字信号,可以相应地把通信系统分为两类:模拟通信系统和数字通信系统。

应当指出,模拟信息分布于自然界的各个角落,如温度变化趋势、连续的山峰、连续的曲

调等；而数字信号，例如 1 和 0 变换的二进制码，在信道中传输时具有抗干扰能力强、便于加密处理、设备便于小型化、集成化等优点。因此，现代通信中最常用的数字通信系统，一般是先将模拟信号通过采样、量化变换为数字信号，经数字通信方式传输后，在接收端再进行数字-模拟变换，还原出模拟信号。

3. 通信系统分类

通信系统具有不同的分类方法。按照消息的物理特征不同，通信系统可以分为语音通信系统、数据通信系统、图像通信系统；按照信号的特征分类，可以分为模拟通信系统和数字通信系统；按照是否调制分类，可以分为基带传输系统和频带传输系统；按照信道传输媒介的不同，可以分为有线通信系统和无线通信系统，其中有线通信系统又可以分为光纤通信、电缆通信等。

3.2 光纤通信的基本概念

光纤通信是以光纤为传输媒介，以光波为携带信息的载波的通信系统。如果将光纤通信设想为高速公路运输系统，传输的信息比作“货物”，那么，光纤就可以理解为“高速公路”，载波信号光波，就是高速公路上奔跑的“运输车”。

为什么要用光波作为载波来传输信息呢？这是因为，光波是频率极高的电磁波，一般光纤通信中的光波属于红外光区域，频率在 10^{14} Hz (100 THz) 量级，依据香农公式“在被高斯白噪声干扰的信道中，信道容量与信道带宽成正比”，因此工作在高频段的光纤具有很大的通信容量，在传输容量需求急剧增加的现代通信中得到广泛应用。

目前，单根光纤上可传输的信号总容量已经达到 100 Tb/s，商用系统中已经广泛采用的单信道传输容量达到 40 Gb/s。一般语音信号的频率范围为 300~3400 Hz，对其进行脉冲编码调制 (PCM) 实现模拟-数字转换后，数字语音信号的信号速率为 64 kb/s (具体原理和过程将在《数字信号处理》《通信原理》等课程中讲解)。因此理论上，单根光纤可以同时传输几十亿路语音信号。图 3.2 为光缆的结构示意图，一般一根光缆包括有若干根光纤，其传输容量更是巨大。

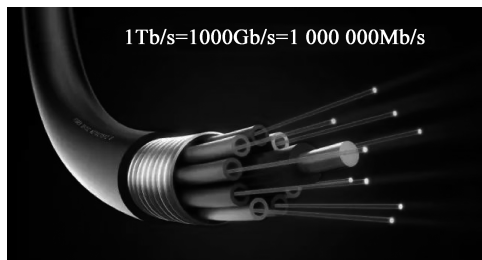


图 3.2 光缆的结构示意图

3.2.1 光纤通信简史

广义地说，以光波作为载体来传递信息进行光通信，并不是什么新鲜事。早在公元前 2000 多年，“周幽王烽火戏诸侯”故事中的烽火台，就是一种古老的光通信设备，各地诸侯通过看见烽火台上点燃的烟火，获得有敌人入侵的信息，从而领兵救援国都，如图 3.3 所示。此外，从古代沿用至今的旗语、灯光和手势等，都可以看作是某种形式的光通信。但是，这些依赖可见光信号传递信息的方法不仅较为简单，容易受外界因素（如阳光、雾和雨雪天气等）的影响，同时信息的内容也极为有限且不可靠，信息传输的有效距离非常短。

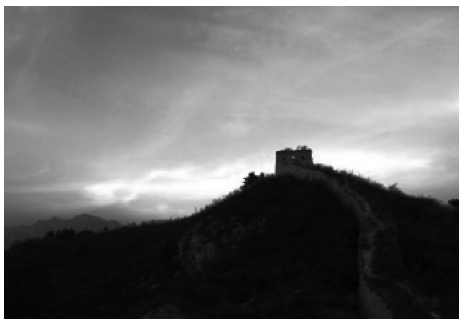


图 3.3 广义光通信示例

1880 年, 贝尔 (A. G. Bell) 发明了光电话, 这被认为是现代意义上光通信的起源。如图 3.4 所示, 贝尔利用弧光作为光源, 弧光灯发出恒定亮度的光束并投射在送话器的薄膜上; 薄膜随发送端的话音而振动, 使反射光的强弱随着话音的强弱作相应的变化, 从而使话音信息“承载”在光波上(这个过程叫调制)。在接收端装有一个大型的抛物面反射镜, 它把经过大气传送过来的载有话音信息的光波反射到硅光电池上, 硅光电池将光能转换成电流(这个过程叫解调), 电流再送到受话器还原出原始语音, 就完成了发送和接收的过程。

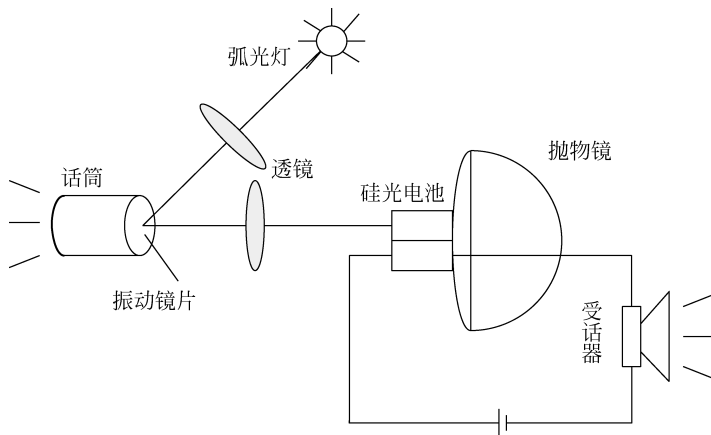


图 3.4 贝尔发明的光电话示意图

贝尔发明的光电话提供了最基本的光通信的雏形, 但自此之后的相当长一段时间内, 光通信技术的进展非常缓慢, 始终未能成为通信系统中的主流技术。究其原因, 一方面贝尔光电话和烽火报警一样, 都是利用大气作为传输媒介, 而可见光在大气中传输损耗很大, 无法实现长距离传输; 另一方面, 贝尔使用的光源是热辐射源, 其发出的光是非相干光, 单色性和方向性差且调制困难。随着研究的不断深入, 人们注意到实用化的光通信主要面临两个问题: 一是寻找合适的光源, 二是探寻对光信号具有良好传输性能的媒介。

1960 年, 美国人希尔多·梅曼 (Theodore H. Maiman) 发明了第一台红宝石激光器, 人们注意到, 这种谱线很窄、方向性极好、频率和相位都高度一致的相干光——激光可以作为光通信理想的光源。之后氦氖激光器、二氧化碳激光器、染料激光器等相继被发明并投入使

用,给光通信带来了新的希望。但是由于这些激光器存在体积大、功耗大等缺点,同时以大气为传输媒介受气候影响很大,光通信的发展仍然受到制约。

那么能不能找到一种介质,就像电线电缆导电一样来传光呢?古代希腊从吹玻璃工匠那观察到,光可以从玻璃棒的一端传输到另一端。1930年,有人拉出了石英细丝,人们称之为光导纤维(简称光纤)或光纤波导,并论述了它传光的原理。但那时科学家们的研究方向是通过光纤进行图像传输,比如医学窥镜、用于军事的可弯曲潜望镜等,而且当时的光纤传输性能比较差,传输损耗非常严重。1950年前后,印度裔科学家 N. S. Kapany 展示了带有包层的光纤,这使得图像在光纤中的传导效果大大提升。1956年,科学家们研制出了可弯曲的光纤内窥镜,在研制过程中,同是这个研究组的成员 Lawrence E. Curtiss,制造出了第一根采用玻璃为包层的光纤(见图 3.5)。光纤发展至此,无论在结构上还是在材质构造上,与现在使用的光纤基本一致了。

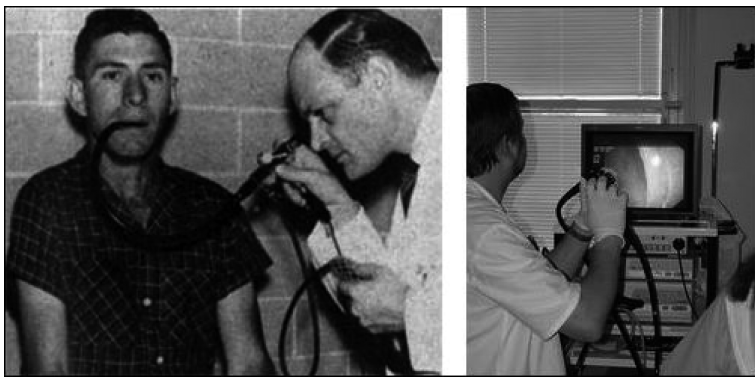


图 3.5 内窥镜的过去与现在

但直到 20 世纪 60 年代,用当时最好的光学玻璃做成的光学纤维其损耗也高达 1000dB/km。进行单位换算之后,损耗为 1dB/m,即信号每传输 1m 的距离,其能量就损耗掉约 20%,无法将光纤应用于长距离通信。

1966 年,在英国标准电信实验室工作的华裔科学家高锟(C. K. Kao)和 G. A. Hockham 发表了具有历史意义的关于通信传输新介质的论文,指出光纤材料的高损耗是由其中的杂质离子引起的,如果将材料中的金属离子含量的比重降低到 10^{-6} 以下,光纤损耗就可以减小到 10dB/km。高锟推断出,高纯度的石英玻璃是制造可用于实现光通信的光纤的首选材料,当玻璃纤维的衰减率低于 20dB/km 时,光纤通信即可成功,这为光纤通信迈向实用化奠定了重要的理论基础。2009 年,高锟以在“有关光在纤维中的传输以用于光学通信方面”取得的突破性成就获得诺贝尔物理学奖,被誉为“光纤通信之父”(见图 3.6)。

在高锟理论的指导下,1970 年美国康宁公司(Corning)采用超纯石英为基本材料,成功研制出了第一根损耗系数低于 20dB/km 的光纤。在光纤制造工艺有了重大突破的同一年,美国贝尔实验室和日本 NEC 公司先后研制成功了可以在室温下连续振荡的半导体材料为核心的半导体激光器,为光纤通信找到了合适的光源。因此,1970 年,被认为是光纤通信实用化的开始。自此,光纤通信进入了一个蓬勃发展阶段。

在光纤研制方面:1972 年,美国康宁公司将光纤损耗系数降到了 4dB/km。1973 年,美国贝尔实验室发明了低损耗光纤制作法——改进的化学气相沉积法(MCVD),使光纤损耗



图 3.6 “光纤通信之父”高锟——2009 年诺贝尔物理学奖获得者

降到了 1dB/km 。1976 年,日本把光纤的损耗降低到 0.5dB/km 。1979 年,日本制造出了损耗系数为 0.2dB/km 的超低损耗光纤。

在激光器光源方面:1972 年,日本 NTT、美国贝尔实验室研制成功了 InGaAsP 长波长激光器。1976 年,贝尔实验室研制成功了室温下外推寿命为 100 万小时的 GaAlAs 激光器,为光纤通信的商用化奠定了基础。1979 年,美国和日本先后研制出工作波长为 1550nm 的半导体激光器。

在光纤通信系统方面:1976 年,美国首先成功进行了系统容量为 44.736Mb/s ,传输距离为 10km 的光纤通信系统现场实验。1980 年,第一个多模光纤通信系统投入商用。随后数年,日本、美国、英国等国家开始兴建光纤干线通信系统。

光纤通信开始进行实用化之后,大致经过了以下几个阶段:

第一代光纤通信系统在 20 世纪 70 年代末投入使用,多为工作波长 850nm 的多模光纤通信系统。光纤的损耗系数典型值为 $2.5\sim 4.0\text{dB/km}$,系统容量最高为 $34\sim 45\text{Mb/s}$,中继距离为 $8\sim 10\text{km}$ 。随后,工作波长为 1310nm 的多模光纤通信开始投入使用,光纤损耗系数下降到 $0.55\sim 1.0\text{dB/km}$,系统容量达到 140Mb/s ,中继距离为 $20\sim 30\text{km}$ 。

第二代光纤通信系统在 20 世纪 80 年代中期投入使用,多为工作波长为 1310nm 的单模光纤通信系统。光纤损耗系数典型值为 $0.3\sim 0.5\text{dB/km}$,商用系统的最高传输容量可达 $140\sim 565\text{Mb/s}$,中继距离约为 50km 。

第三代光纤通信系统在 20 世纪 80 年代后期投入使用,是工作波长为 1550nm 的单模光纤通信系统。光纤损耗系数进一步下降到接近 0.25dB/km ,传输速率达 $2.5\sim 10\text{Gb/s}$,中继距离可超过 100km 。

第四代光纤通信系统在 20 世纪 90 年代投入使用,至今应用,普遍采用了光放大器来增加中继距离,同时采用波分复用/频分复用(WDM/FDM)技术来提高传输速率。目前商用系统中单信道最高传输容量可达 $40\sim 100\text{Gb/s}$,系统总传输容量可达到 1.6Tb/s ,而在实验室中最高的系统容量已经达到 100Tb/s 。

从光纤通信技术的发展趋势和特点来看,光纤通信将会在超大容量超长距离传输、灵活组网、宽带接入和全光通信等方面获得进一步发展。光纤通信系统的每个模块、每个环节涉

及的技术,都为了这个趋势在精益求精,因此衍生出更为庞大复杂的光纤通信技术领域,例如波分复用系统 WDM、同步数字体系 SDH、无源光网络 PON、光交换技术、超强 FEC 纠错技术、电子色散补偿技术、偏振复用相干检测技术、光孤子通信、量子光通信等。这些内容,将在后续的光纤通信课程中进行深入讲解。

3.2.2 光纤通信系统组成

与电信系统一样,光纤通信系统的基本功能是将来自信源的信息可靠地发送到信宿端的相应设备。图 3.7 给出了光纤通信系统的基本组件。最关键的部分包括:由光源及其驱动电路组成的光发送机;由光检测器和放大电路、信号恢复电路组成的光接收机;传输光信号的成缆光纤;以及一些附加的元器件如光放大器、连接器、耦合器等。

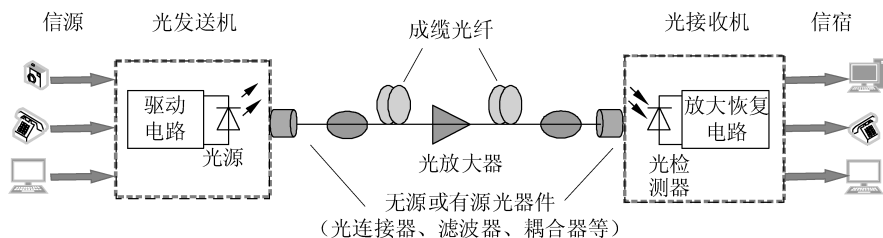


图 3.7 光纤通信系统的基本组成示例

在发送端,发送电端机将来自电话、计算机等的信源信息变为电信号,然后送入光发送机,使光发送机的光源发出携带信息的光信号(调制),并把已经调制的光波信号耦合送入光纤中进行传送。经光纤长距离传送后,光信号会受到光纤损耗和色散等的影响而产生畸变,为了保证长距离可靠传输,系统中间可配置光中继器或光放大器对信号进行放大、处理。光信号传送到接收端,耦合进入光接收机,由光接收机中的光检测器把光信号转换为携带信息的电信号,经过放大、均衡、判决等过程恢复成与发送端一致的信号,送到接收端还原成原始的各种业务信号,送到相应的信宿设备。

3.2.3 光纤通信的特点及应用

在光纤通信系统中,作为载波的光波频率比电波频率要高得多,而作为传输介质的光纤又比同轴电缆损耗低得多,因此光纤通信具有很多独特的优点。

① **频带宽、传输容量大。**在光纤中传输的载波光波属于近红外线范围,其典型的工作波长覆盖了 1310~1625nm 区域,有着极高的信号频谱带宽,因此光纤通信的传输容量很大。另一方面,在一根光缆中容纳数百根甚至数千根光纤的高密度光纤技术、同一根光纤中具有多个纤芯的多芯光纤技术、波分复用技术等,使得光纤通信系统的传输容量更是成倍增加。

② **传输损耗小、中继距离长。**电缆的损耗一般在几分贝到十几分贝,而最常用的标准单模光纤在 1310nm 波长窗口的典型损耗系数为 0.35dB/km,在 1550nm 波长窗口的典型损耗系数约为 0.2dB/km,光纤中的信号损耗远小于电缆中的损耗,因此光纤通信系统中的中继距离可以很长。现阶段使用较多的单信道传输速率为 10Gb/s 的光纤通信系统,其典型的中继距离可达 100km,若采用光纤放大器和色散补偿光纤等,中继距离还可增加。

③ **信号泄露小、保密性好**。现代侦听技术已能做到在离同轴电缆几千米以外的地方窃听电缆中传输的信号,保密性不高。由于光纤传输的特殊机理,在光纤中传输的光信号向外泄漏的能量非常微弱,难以被截取或窃听,同时没有专用的特殊工具,光纤是不能分接的,因此信息在光纤中传输比较安全。

④ **抗电磁干扰性能好**。光纤主要是由电绝缘的石英材料制成,它不易受外界各种电磁场的干扰,包括强电、雷击和磁场变化等都不会显著影响光纤的传输性能。因此,光纤通信在电力输配、雷击多发区、核试验、煤矿、油田等易燃易爆环境中应用更能体现其优越性。

⑤ **节省有色金属**。制造传统的电缆需要消耗大量的铜和铅等有色金属,这些金属材料在地球上的储量是有限的,而制造光纤的石英(主要成分为 SiO_2)原材料丰富而便宜,几乎取之不竭。

⑥ **体积小、重量轻、敷设方便**。光纤的主要材料是介质,而光缆的构成元件中金属加强件的重量也比其他通信电缆的重量轻得多,因此光缆的单位长度重量很轻。同时光缆的外径较小,传统的敷设电缆的管道中可以敷设多根光缆,可以充分利用地下管道资源。

总之,由于光纤通信中,光纤是用具有极好电绝缘性的石英玻璃和塑料制成的,而且载波光信号频带宽、传输容量大、不易泄露,因此在很多场合得到广泛应用。光纤通信的典型应用场合包括:

① **通信网**。主要包括遍及全球的电信网和 Internet 中做语音和数据通信的骨干传输网,包括国际间的海底和陆地光缆系统、各国的骨干公共电信网、覆盖城市及其郊区的城域网等。

② **计算机网络**。主要包括连接不同规模的用户局域网、数据中心、存储局域网等的交换机、路由器和服务器等,构成高速的计算机通信链路。

③ **有线电视网**。如数字交互式有线电视的干线传输和分配网、工业上使用的监控视频信号和自动控制系统的数据传输等。

④ **专用通信网**。包括电力、铁路、高速公路、煤炭开采等特殊应用场合的光纤通信系统。这些应用环境中,有的是极高电压环境,有的是由于安全因素不能采用金属导线,有的则需要抵御电磁场环境,光纤因其良好的物理和传输特性成为理想的传输介质。此外,在包括医疗(如各类内窥镜)和军事等应用场合中光纤也具有无可替代的优点。

3.3 光纤通信的“运输车”——载波光信号

通过 3.2 节对光纤通信的概述,了解到并不是任意频率的光波都可以用作光纤的载波的,哪些频率在光纤通信中可用? 光纤通信能够迅速发展是因为光信号在光纤内传输时的损耗降低了,损耗系数的单位中分贝代表什么含义? 本节将对这些基本概念进行简单介绍。

3.3.1 光频谱带

所有的电信系统都使用一定形式的电磁波传送信息,电磁辐射频谱如图 3.8 所示。根据不同的频谱特点和约定俗成的称谓,电磁波包括电力、无线电波、微波、红外光、可见光、紫外光、X 射线、 γ 射线等,每部分的频带都构成电磁频谱的一部分。

不同频段的电磁波的物理性质可以用三个相关的参量来度量,包括一个周期波的长度

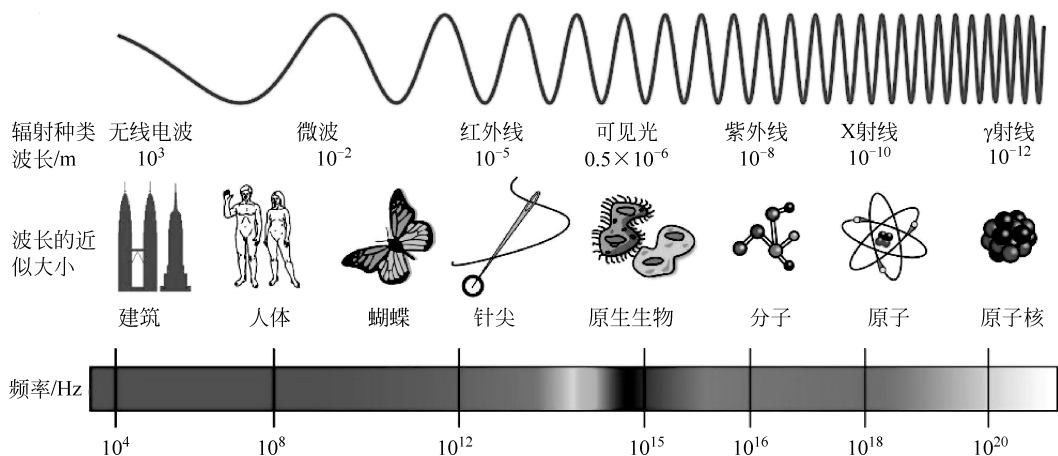


图 3.8 电磁辐射频谱

(波长)、波的振荡频率、波的能量。电通信中一般都使用频率来指定信号的工作频带,光通信中一般用波长来表征其频谱工作范围,而用光子能量或光功率描述其信号强度。

任意频率的电磁波在真空中传播时的速度都是光速 $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$ 。真空中的光速 c 是电磁波波长 λ 和其频率 f 之积,即

$$c = \lambda f \quad (3.1)$$

在光通信领域,光子能量与其频率之间的关系由普朗克定律确定,即

$$E = hf = hc/\lambda \quad (3.2)$$

其中,普朗克常数 $h = 6.63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ 。

从波长角度看,光谱范围大约在从紫外线区域的 10nm 到远红外区域的 1mm,其中 400~770nm 为可见光频段,光学通信常用近红外区域的 770~1675nm 作为工作频带。在光学通信的波段范围内,也根据应用和频带特性划分了很多区域。770~910nm 波段通常称为短波段,一般为多模光纤通信系统所用。国际电信联盟(ITU)在 1260~1675nm 之间命名了 6 个光纤通信工作频带,分别用字母 O、E、S、C、L 和 U 表示,如图 3.9 所示,其中 O 波段和 C 波段是单模光纤通信系统常用的两个波段。

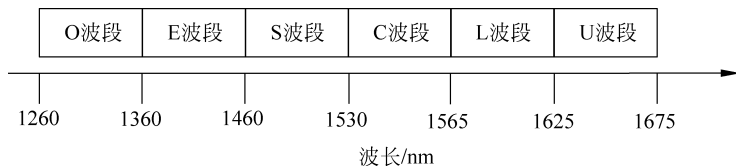


图 3.9 光纤通信所用的波段代号

为什么这几个波段是光纤通信的常用波段呢?前面讲过,光纤能够用于光通信的关键,是光纤对光信号的损耗降低到一定程度。光纤的一个最基本特性就是其衰减是波长的函数,图 3.10 给出了石英光纤随波长变化的衰减曲线。由图所示可以看出,在 850nm, 1310nm 和 1550nm 附近共存在三个低损耗窗口,对应 770~910nm 的短波段、O 波段和 C 波段,因此这三个波段是光纤通信系统的三个主要的传统工作波段。

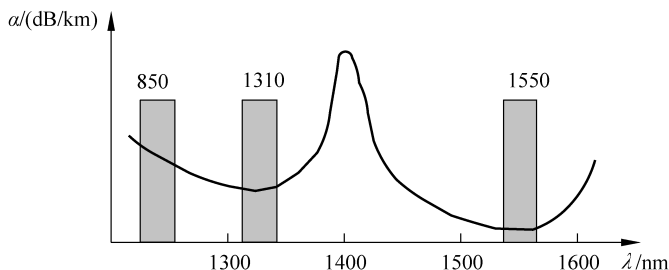


图 3.10 石英光纤衰减曲线

3.3.2 分贝单位

在设计或构建光纤通信线路时,一个重要的问题是在传输线路的每个组件和节点上确定、测量和比较光信号电平(光功率),因此需要知道光发送机的光源的输出功率、光接收机的检测器能够检测到的最小功率以及传输线路中所有组件的功率损耗。

测量传输线路或者组件损耗的常用方法是比较其输入和输出信号电平。对于光纤来说,光信号强度通常随传输距离呈指数衰减,因此采用功率比的对数作为度量单位是比较恰当的,也就是用分贝(dB)。式(3.3)给出了分贝的定义。

$$\text{以分贝为单位的功率比} = 10 \lg \frac{P_2}{P_1} \quad (3.3)$$

式中, P_1 和 P_2 为测量线路或组件的输入和输出光功率电平。

用分贝对数特性可以将很大的比值用比较简单的数据表示。例如,功率降低 1000 倍就是一 30dB 的损耗,50% 的衰减就是一 3dB 的损耗,10 倍的放大就是 10dB 的增益。根据对数的数学特性可以知道,用分贝表示的另一个优点是在一系列光链路器件中,测量两个不同点之间的信号强度变化只需要进行加减法运算。

分贝值是一个比值或相对值,因而它不给出功率的绝对值,在光纤通信中特别常用的单位是分贝毫瓦(dBm)。用分贝毫瓦表示的功率电平的绝对值定义为式(3.4)。

$$\text{功率电平(dBm)} = 10 \lg \frac{P(\text{mW})}{1 \text{mW}} \quad (3.4)$$

3.4 光纤通信的传输媒介——光纤

光纤是光纤通信系统中的传输媒质,其材料、结构和传输性能直接影响了整个系统的性能。为了保证良好的通信质量,必须根据实际使用环境设计各种结构的光纤。本节将对光纤和光缆的结构、光纤的导光原理、传输特性等进行简单介绍。

3.4.1 光纤的结构和分类

1. 光纤的结构

现代通信用光纤的基本结构由三部分构成:纤芯、包层和涂覆层,其结构如图 3.11 所示。

① 纤芯。主要构成材料是 SiO_2 (石英),一般会掺杂微量的掺杂剂,如 GeO_2 (二氧化

锺),用以提高纤芯的折射率 n_1 。通信用光纤的纤芯直径一般为 $7\sim 9\mu\text{m}$ (单模光纤)或 $50\sim 80\mu\text{m}$ (多模光纤)。

② **包层**。一般采用纯 SiO_2 (石英),和纤芯在物理上是一个整体,包层的折射率 n_2 低于纤芯的折射率 n_1 ,用于把光能量限制在纤芯内。包层的外径一般为 $125\mu\text{m}$ 。

③ **涂覆层**。涂覆层采用环氧树脂、硅橡胶等高分子材料,主要目的是为光纤提供基本的物理及机械保护,去除涂覆层后的光纤称为裸光纤。实际应用中,为增强光纤的力学、物理性能,在涂覆层外还可以有二次涂覆层。具有一次涂覆层的光纤外径为 $250\mu\text{m}$,二次涂覆层的光纤外径为 $900\mu\text{m}$ 。

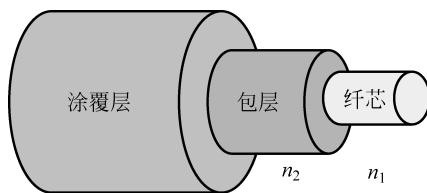


图 3.11 光纤的基本结构

2. 光纤的分类

根据光纤结构、构成材料、传输模式等不同,光纤可以分成多种类型。

(1) 按照折射率分布

根据光纤横截面上折射率的径向分布情况,光纤可以分为阶跃折射率光纤(SI型)和渐变折射率光纤(GI型)。

① SI型光纤: 折射率在纤芯为常数 n_1 ,到包层突变为常数 n_2 ,且 $n_1 > n_2$,看起来像是在纤芯和包层的交界处折射率呈阶梯形变化,如图 3.12(a)所示。

② GI型光纤: 纤芯折射率 n_1 在纤芯中心最大,随着半径增加按一定规律减小,到纤芯和包层的交界处减小为包层的折射率 n_2 ,如图 3.12(b)所示。

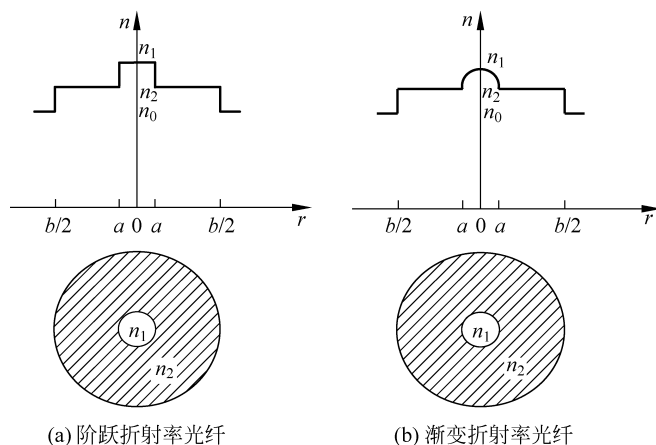


图 3.12 光纤的分类

(2) 按照光纤传导模式

所谓模式,实际上是电磁场的一种分布形式或分布规律,具有多个模式,即电磁场具有多种分布形式。根据光纤中光信号传输时的模式数量,可以分为单模光纤(SMF)和多模光纤(MMF)。

① **单模光纤**: 纤芯直径很小,一般为 $7\sim 9\mu\text{m}$ 。单模光纤只能传输一个模式,即主模,没有模式间色散,因此传输频带很宽,传输容量较大,适用于大容量、长距离的光纤通信。单模光纤纤芯较细,需要采用激光器做光源,成本较高。

② 多模光纤：纤芯直径一般为 $50\sim 80\mu\text{m}$ ，包层直径为 $100\sim 200\mu\text{m}$ 。多模光纤在一定的工作波长下，可以有多个模式在光纤中同时传输，容易产生模式间色散，传输性能较差，带宽比较窄，传输容量较小，一般用于短距离、低速的光纤通信系统。多模光纤纤芯较粗，光源一般采用发光二极管，成本较低。

(3) 按照光纤构成材料

按照构成光纤的材料，可以分为石英光纤、硅酸盐光纤、卤化物光纤、塑料光纤和液芯光纤等。通信光纤中应用最普遍的是石英光纤，本书介绍的光纤通信体系也是在石英光纤的基础上给出的。

3.4.2 光缆的结构和分类

光纤的直径在微米量级，比头发丝还细，可以想象，在实际应用中光纤很难进行敷设，也极易受到外力、外物的影响，需要置入某种光缆结构中使用。光缆是依靠其中的光纤来完成传送信息的任务，因此光缆的结构设计必须要保证其中的光纤具有稳定的传输特性。同时，由于光缆多在野外或室外工作，施工敷设过程中要考虑很多的影响因素。例如，光缆可能会受到外力导致的弯曲、拉伸和扭曲变形；敷设在土壤和水下的光缆可能会受到酸性或碱性腐蚀；在特定的区域还可能受到白蚁或啮齿类动物的啃咬等。因此，光缆必须具有足够的机械强度以及相应的抗化学性和抗腐蚀性，为了便于施工维护和降低系统成本，光缆的结构也不宜过于复杂。

光缆的结构一般包括缆芯、加强元件和外护层等。缆芯由单根或者多根光纤芯线组成，是传输光信号的主体；加强元件用于增强光缆敷设时可承受的负荷，通常处在缆芯中心，材料一般为钢丝或非金属纤维；外护层为物理防护层，作用为防水防潮、抗拉抗压抗弯等。图 3.13 展示了一段光缆的内部结构。

图 3.14 给出了一种典型的光缆结构以及光纤成缆过程中用到的一些材料。单根光纤或成束的基本光纤单元，以及用于对在线设备供电的铜线松散地绕在中心加强件上，然后用光缆包带和其他加强件将这些光纤单元包封、粘连在一起，外面套上聚合物外护套，使光缆耐压和抗拉伸，保证内部光纤不受损伤。护套还能保护光纤免受磨损、潮湿、油、溶剂以及其他污染物的腐蚀。



图 3.13 光缆的内部结构

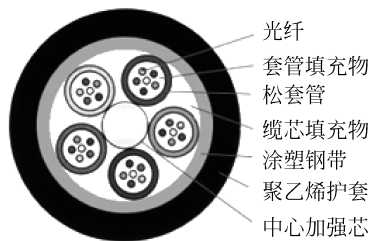


图 3.14 典型光缆结构示意图

根据光缆中光纤的类别、成缆方式、结构元件的选取和制造工艺、使用环境等，光缆可以进行多种分类。按照缆芯结构的不同，可以将光缆分为层绞式、骨架式、中心束管式和带状光缆等；按照加强元件和外护层的结构不同，可以将光缆分为金属加强件光缆、非金属加强

件光缆、铠装光缆和全介质光缆等；按照使用场合不同,可以将光缆分为普通光缆、用户线光缆、软光缆、室内光缆、海底光缆等；按照敷设方法不同,可以将光缆分为架空、管道、直埋和水下光缆等。

目前光缆敷设方法中,以管道敷设方式较多,一般应用于城市或铁路、公路等交通基础设施较为完备的场合,充分利用已有的管道资源。长途光缆中不具备管道条件的情况,大多采用直埋方式,一般要求光缆外部具有钢带或钢丝的铠装。图 3.15(a)和(b)分别为工人进行光缆直埋和光缆管道敷设的施工现场。

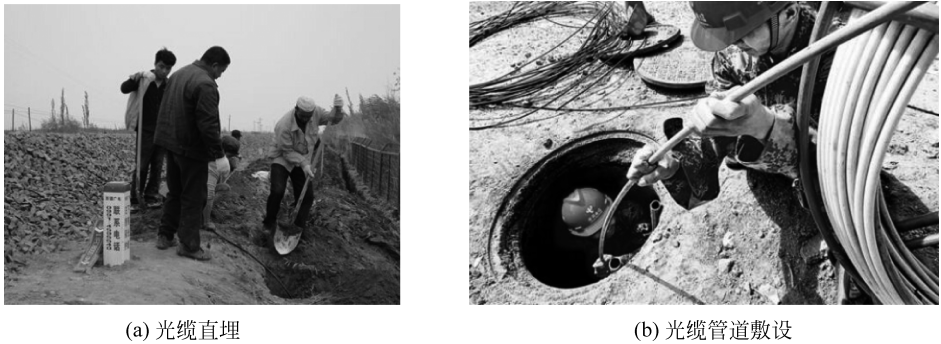


图 3.15 光缆敷设施工

3.4.3 光纤的导光原理

了解了光纤和光缆的结构以后,来看一下,为什么这么细的玻璃丝可以将光信号进行远距离传输。

1. 光的反射和折射

材料最基本的光学参数是它的折射率。在自由空间中光以速度 $c=3\times10^8\text{m/s}$ 传播,当光进入电介质或非导电媒质时,将以速度 v 传播, v 与材料的特性有关且总是小于真空中的光速 c 。定义真空中的光速度 c 与材料中光传播速度 v 之比即为材料的折射率 n ,其定义式为

$$n=\frac{c}{v}$$

(3.5)

表 3.1 给出了不同材料的折射率。

表 3.1 不同材料的折射率

材 料	折 射 率	材 料	折 射 率
丙酮	1.356	玻璃	1.52~1.62
空气	1.000	有机玻璃	1.489
水	1.333	硅(波长)	3.650@850nm
普通酒精	1.361	熔融石英(波长)	1.453@850nm
砷化镓	3.299(红外区域)		

用光射线代表光信号的传输轨迹,当光射线从一种折射率为 n_1 的媒质入射到另一种折射率为 n_2 的媒质时,在两种媒质的分界面处会产生反射和折射现象,光射线之间的方向关

系遵循斯涅尔(Snell)定律,包括反射定律和折射定律。

① **反射定律**: 反射光线、入射光线和法线在同一平面内,反射光线和入射光线分居法线两侧,并且与界面法线的夹角相等,即反射角等于入射角。

② **折射定律**: 折射光线位于入射光线和界面法线所决定的平面内,折射光线和入射光线分居法线两侧,入射角的正弦与入射光线所在媒质的折射率的乘积等于折射角的正弦与折射光线所在媒质折射率的乘积。其表达式为

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \quad (3.6)$$

式中, n_1 和 n_2 分别为两种媒质的折射率; θ_1 和 θ_2 分别为入射角和折射角。

③ **全反射现象**: 根据式(3.6),如果 $n_1 > n_2$,则 $\theta_1 < \theta_2$,即入射光线从折射率较大的媒质(光密媒质)向折射率较小的媒质(光疏媒质)入射时,入射角小于折射角。可以想象,当入射角 θ_1 增大到某一值时,折射角 θ_2 达到 90° ,折射光线与分界面表面平行,这个特殊的入射角称为临界角 θ_c 。当入射角 θ_1 大于临界角 θ_c 时,光的折射现象消失,不会再有光从当前媒质中“逃出”,而是在媒质的界面处所有光线都会被反射回来,这一现象称为全反射现象。

如图 3.16 所示,水下的一条鱼看向岸边树木,当视线的入射角 θ_1 小于全反射的临界角 θ_c 时,可以看到岸上的树木,当视线的入射角大于或等于全反射的临界角 θ_c 时,会感到晃眼什么也看不见,视线发生了全反射现象。因此,只有在 $2\theta_c$ 的视线范围内,水下的鱼才能看见岸边的景物。

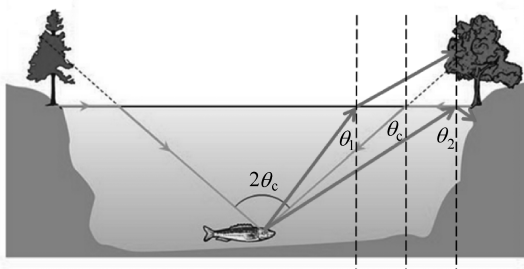


图 3.16 由于全反射现象,水下部分角度的视线看不见岸边物体

2. 光纤的导光原理

光信号能够在光纤中传输,就是基于全反射原理。通过合理设计光纤纤芯和包层的折射率,使得光信号在纤芯和包层分界面上反复进行全反射,从而闭锁在光纤内进行长距离传输。

以阶跃折射率光纤为例,光射线由纤芯向包层入射的全反射现象如图 3.17 所示。图中 $n_0=1$,为空气折射率, n_1 为纤芯折射率, n_2 为包层折射率,满足 $n_1 > n_2$ 。

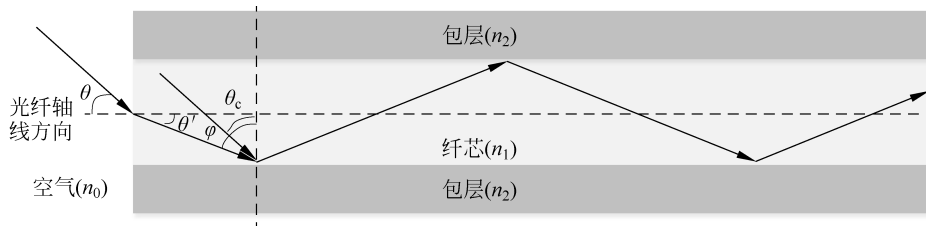


图 3.17 阶跃折射率光纤的全反射

在光纤的入射端面,与光纤轴线夹角为 θ 的入射光线,由光纤端面与空气的分界面处进入光纤纤芯并产生折射,由于 $n_0 < n_1$,根据斯涅尔折射定律可知折射角 $\theta' < \theta$,即有

$$n_0 \sin \theta = n_1 \sin \theta' = n_1 \cos \varphi \quad (3.7)$$

在纤芯与包层的分界面处,为不使光线折射进入包层中向外辐射,必须使其在纤芯和包层的分界面处产生全反射,即入射角大于全反射临界角, $\varphi > \theta_c$ 。则有

$$\sin \varphi > \sin \theta_c = \frac{n_2}{n_1} \quad (3.8)$$

对式(3.7)和式(3.8)进行分析可知,当在光纤入射端面满足下式时,进入光纤的入射光线就能在纤芯-包层分界面处产生全反射:

$$n_0 \sin \theta < \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (3.9)$$

因此,由纤芯-包层分界面处的全反射条件,可以推导出光纤端面的最大入射角 θ_a ,即

$$\theta_a = \arcsin \frac{\sqrt{n_1^2 - n_2^2}}{n_0} \quad (3.10)$$

只有当入射光线在光纤端面的入射角小于最大入射角 θ_a 时,才能在光纤纤芯和包层分界面处发生全反射,从而闭锁在光纤中形成传导模。实际应用中,更常用数值孔径(NA)来描述光纤端面接收和传输光的能力,数值孔径定义为光纤端面的最大入射角 θ_a 的正弦与空气折射率的乘积,定义如下:

$$NA = n_0 \sin \theta_a = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (3.11)$$

3. 单模传输的原理

上述导光原理是从光学的角度来分析的,虽然形象地解释了光纤中光的传输原理,但只是一种近似分析方法,无法对光在光纤中的传输状态进行严格的定量分析。光波是一种特定频率的电磁波,因此可以用波动光学理论对光纤中的光信号进行定量分析。

电磁波是由同相振荡且互相垂直的电场与磁场在空间中以波的形式传递能量和动量,空间中任意一点的电磁场特性可以由麦克斯韦方程组来概括。均匀、各向同性的媒质中,无源区的麦克斯韦方程组可以简化为:

$$\begin{cases} \nabla \times \mathbf{E} = -\mu \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} \\ \nabla \times \mathbf{H} = \epsilon \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \\ \nabla \cdot \mathbf{E} = 0 \\ \nabla \cdot \mathbf{H} = 0 \end{cases} \quad (3.12)$$

其中, $\mathbf{E}$ 和 $\mathbf{H}$ 分别为电场强度矢量和磁场强度矢量, ϵ 和 μ 分别为介质的介电常数和磁导率。

在光纤中,携带传输信息的光波作为一种电磁波,也满足上述麦克斯韦方程组。可以形象地理解为,光纤的结构把电磁场束缚在纤芯里,并引导着电磁场沿光纤延伸方向传播,这就给出了针对光纤传输的特定的初始条件和边界条件。有了方程,有了边界条件,就可以求出方程的解,也就是光纤中电场 $\mathbf{E}$ 和磁场 $\mathbf{H}$ 随时间和空间变化的表达式,每一组解对应着电磁场在光纤中的一种特定分布形式,即模式。

经过复杂的计算和数学处理,可以求出光纤中的麦克斯韦方程组有多个解,即光纤中可

以存在多种模式的传输电磁场。不同的模式具有不同的截止频率,只有光信号的归一化频率大于某个模式的截止频率,光信号才能以对应的模式在纤芯中传输。在所有的模式中,只有 HE_{11} 模式不存在模截止条件,即截止频率为零。也就是说,当其他所有模式均截止时,该模式仍能传输,因此称 HE_{11} 模为光纤的主模。

定义参数归一化频率 V ,表示为

$$V = \frac{2\pi a}{\lambda} \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (3.13)$$

式中, a 为光纤纤芯的半径; n_1 和 n_2 分别为纤芯和包层的折射率; λ 为光信号的工作波长。当 $V < 2.405$ (2.405 为第一个高阶模的归一化截止频率)时,光纤中只存在主模,其他高阶模式均被截止,此时电磁场在纤芯中只有主模对应的一种分布形式,称为单模传输。

由式(3.13)可以看出,单模传输的理论截止波长 λ_c 为

$$\lambda_c = \frac{2\pi a}{2.405} \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (3.14)$$

截止波长是单模光纤的基本参数,判断一根光纤是否满足单模传输条件,可以比较光纤中传输的光信号的波长 λ 与理论截止波长 λ_c 。如果 $\lambda > \lambda_c$,则满足单模传输条件; $\lambda < \lambda_c$,则不能进行单模传输。

从光学的角度看,光线的入射角越小,激发的模式的阶数越低。当光纤的纤芯半径很小时,光纤只允许与光纤轴线一致的光线通过,即只允许通过一个基模,即为单模传输。

3.4.4 光纤的传输特性

光纤中的光信号经过一定距离的传输后,信号质量会劣化,主要表现在光信号强度变弱,光脉冲的波形展宽,继而引起码间干扰等现象并影响通信系统的性能。信号质量劣化的主要原因是光纤中存在损耗、色散和非线性效应等因素,这些因素限制了系统的传输距离和传输容量。

1. 光纤损耗——信号能量损失

光纤损耗一般指光纤中传输的光信号能量的衰减。在光纤通信系统中,当入纤光功率和接收机灵敏度给定时,光纤的损耗特性是限制中继传输距离的重要因素。

假设 P_i 是光纤的输入功率, P_o 是光纤的输出功率, L 是光纤的长度,定义工作波长为 λ 时,单位长度光纤的损耗系数为:

$$\alpha(\lambda) = \frac{10}{L} \lg \frac{P_i}{P_o} \text{ (dB/km)} \quad (3.15)$$

引起光纤损耗的原因是光纤对光能量的吸收损耗、散射损耗和辐射损耗。其中,吸收损耗与光纤组成材料和杂质有关,散射损耗与光纤材料及结构中的缺陷有关,辐射损耗则是由光纤几何形状的微观和宏观扰动引起的。

(1) 吸收损耗

吸收损耗是由光纤材料和杂质对光能的吸收引起的,它们把光能以热能的形式消耗于光纤中。

光纤材料的吸收也称为本征吸收。本征吸收与传输光信号的工作波长有关,它有两个吸收频带:在近红外区域的红外本征吸收是由分子振动引起的,在紫外区域的紫外本征吸

收是由原子跃迁引起的。对 SiO_2 材料而言,红外吸收峰在 9100nm 左右,但其吸收拖尾到 1500~1700nm;紫外吸收峰在 160nm 左右,但其吸收拖尾到 700~1100nm 的波段中。在光纤通信系统工作的 800~1600nm 波段,两种本征吸收都处于吸收尾部,因此引起的吸收损耗相对较小。

光纤中的杂质吸收包括人为掺入的特定元素和由于制造工艺限制带入的其他元素。由于需要构建纤芯和包层的折射率差,以 SiO_2 为主的光纤材料中加入了一定的掺杂剂,如锗、硼、磷等;制造工艺会带入铁、铜、铬等金属杂质离子,以及氢氧根离子等。杂质离子在相应的波长段内具有强烈的吸收,例如氢氧根离子的吸收损耗峰在 950nm、1240nm 和 1390nm 处,其中尤其以 1390nm 的吸收峰影响最严重。

(2) 散射损耗

散射损耗主要是由于光纤材料和结构中存在的均匀及缺陷,如极小的裂隙和气泡等,导致光散射而引起的损耗。散射损耗中影响最大的是瑞利散射损耗,它是由光纤材料内部的密度不均匀和成分不均匀引起的,这两种因素导致光纤内部的折射率在比波长小的尺度上发生变化,从而引起了光的瑞利散射。天气晴朗时的蓝色天空,就是由于太阳光在大气中的瑞利散射导致的。瑞利散射损耗的大小与 λ^4 成反比,所以它会随着波长的增加而显著下降。

综合吸收损耗和散射损耗的影响,可以得出如图 3.18 所示的典型的光纤损耗-波长特性曲线。目前光纤通信所采用的三个低损耗窗口 850nm、1310nm 和 1550nm,就是根据这个损耗-波长曲线确定的,其中 850nm 窗口损耗较大,只用于多模传输;1310nm 和 1550nm 两个窗口损耗较小,用于单模传输。目前光纤损耗典型值在 1310nm 波段为 0.35dB/km 左右,1550nm 波段为 0.25dB/km 左右。

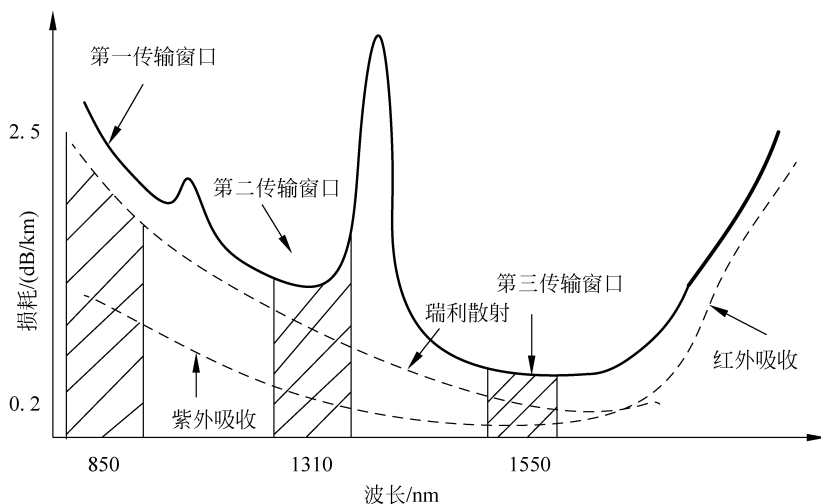


图 3.18 光纤损耗-波长特性

(3) 辐射损耗

光纤是柔软的,可以弯曲,弯曲的光纤虽然仍可以继续导光,但会使光的传播途径改变,一部分光能渗透到包层中或者穿过包层向外辐射泄漏,从而导致传输能量的损耗,即为辐射损耗。光纤受力弯曲有两类:①曲率半径比光纤直径大得多的宏弯,例如光缆敷设中沿着

道路或河流拐弯时就会产生宏弯；②光纤成缆和敷设时产生的随机性微弯，例如在拉丝、成缆或敷设时引入的附加应力导致的光纤细微弯曲。

在实际工程应用中，需要将光纤一根接一根地接起来，这种连接有可能是光纤的焊接，也可能是活动接头的连接。不管是哪种连接，都会产生接续损耗。

2. 光纤色散——信号波形展宽

随着制造工艺的不断提高，光纤损耗对系统的传输距离不再起主要限制作用，色散上升为首要限制因素之一。

在物理课程中学过，一束白光通过一块玻璃三棱镜时，在棱镜的另一侧被散开为红、橙、黄、绿、青、蓝、紫的七色彩带，在光学中这种现象称为色散。这是因为白光是由各种单色光组成的复色光，红光波长最长，紫光波长最短，而不同波长的光在介质中的折射率不同，根据斯涅尔折射定律，它们的折射角也会不同。因此当不同波长的光通过棱镜时，传播方向有不同程度的偏折，因而离开棱镜便各自分散，如图 3.19 所示。

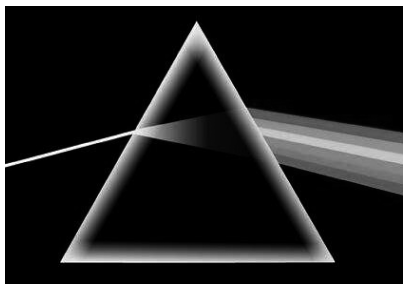


图 3.19 棱镜对入射白光的色散

色散能够给人们带来美丽的彩虹，但是如果色散发生在光纤通信系统中，就没有那么好了。光纤中传输的光信号具有一定的频谱范围，同时光纤中传输的光信号可能具有多个模式，这些不同频率或不同模式的光信号在光纤中的传输速度不同。光脉冲信号在光纤中传输一定距离以后，不同频率或不同模式的信号分量速度不同，将导致光纤某端面处的光脉冲波形发生时间上的展宽，这种现象即为光纤色散。

光纤色散将使沿光纤传输的脉冲随着传输距离延长而出现脉冲展宽，从而可能产生码间干扰，在接收端将影响光脉冲信号的正确判决，增加系统的误码率。因此，色散一方面限制了光纤通信系统的传输距离，另一方面由于高速率系统对于色散更加敏感，因而色散也限制了光纤通信系统的传输容量。图 3.20 给出了光纤色散导致码间干扰的示意图。



图 3.20 光纤色散导致码间干扰

光纤中的色散可分为模式色散、色度色散和偏振模色散等。

(1) 模式色散

只出现在多模光纤中，是由于在同一频率点不同模式的光信号在光纤中传输的群速度不同，引起到达接收端时的时间延迟不同，从而造成接收脉冲波形展宽。

(2) 色度色散

色度色散也称为模内色散，是指在一个单独的模式内发生的脉冲展宽。色度色散是由于光信号中不同频率成分的传输速度不同引起的，包括材料色散和波导色散两种原因。

①材料色散：由于纤芯材料的折射率随波长变化，而光源具有一定的光谱宽度，不同的光波长引起的群速率也不同，从而造成了光脉冲的展宽；②波导色散：对于光纤的某一传输模

式,在不同的光波长下的传输系数也不同,引起了群速度不同导致的脉冲展宽,它与光纤结构的波导效应有关,因此也被称为结构色散。

(3) 偏振模色散

偏振模色散主要是由光纤的双折射效应引起的。起因是单模光纤内虽然只传输一个基模,但这个基模的光波却可以有两个方向的偏振,而光纤内的任何结构缺陷与变形都可能让这两个偏振方向的光波产生不一样的传播速度,这又称为光纤的双折射现象。若这两个偏振模群速度不同,会使信号脉冲展宽,形成偏振模色散(PMD)。

对多模光纤而言,模式色散占主导,材料色散相对较小,波导色散一般可以忽略。对单模光纤而言,材料色散占主导,波导色散较小。在某一特定波长位置上,材料色散有可能为零,这一波长称为材料的零色散波长。石英玻璃的零色散波长恰好位于 1310nm 附近的低损耗窗口,如 G. 652 零色散光纤即工作在这一波长区域。

3. 光纤的非线性效应——信号串扰

在常规光纤通信系统中,发送光功率低,光纤呈线性传输特性。在具有较高入纤光功率的光纤通信系统中,例如使用了光纤放大器的系统,信号传输时可能会产生较为明显的非线性响应,对光纤传输系统的性能和传输特性产生影响。

光纤中常见的非线性效应可以分为受激散射效应和非线性折射效应两种类型,前者包括受激拉曼散射、受激布里渊散射等现象,后者包括自相位调制、交叉相位调制、四波混频等现象。

(1) 受激拉曼散射和受激布里渊散射

这两种散射都可以理解为一个高能光子被散射成一个低能量的光子,同时产生一个能量为两个光子能量差的另一个量子。两种散射的主要区别在于受激拉曼散射的剩余能量转变为分子振动,而受激布里渊散射转变为声子振动。受激拉曼散射和受激布里渊散射都使得入射光能量降低,在光纤中形成一种损耗机制。在较低入射光功率下,这些散射可以忽略,当入射光功率超过非线性效应的阈值后,受激散射效应随入射光功率成指数增加。图 3.21 给出了受激拉曼散射效应的示意图。

(2) 四波混频

四波混频是指当多个频率的光载波以较强功率在光纤中传输时,由于光纤的非线性效应引发多个光载波之间出现能量交换的一种物理过程。例如在波分复用系统(WDM)中,如果有三个频率分别为 ω_i 、 ω_j 和 ω_k 的信道同时传输,四波混频效应会导致初始信道频率间的相互混频,可能会产生第四个频率为 $\omega_{ijk} = \omega_i \pm \omega_j \pm \omega_k$ 的信号,称为四波混频感生频率 ω_{FWM} ,如图 3.22 所示。

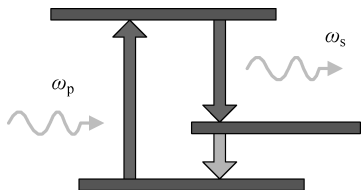


图 3.21 受激拉曼散射效应

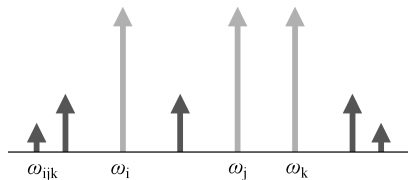


图 3.22 四波混频现象

当然,这些非线性效应并非一味坏事,目前光纤中的非线性效应有两方面的影响:坏的方面会引起传输信号的附加损耗、波分复用系统中信道之间的串扰以及信号载波的移动;

好的方面可以被用来开发放大器、调制器等新型器件,光纤拉曼放大器就是基于受激拉曼散射效应。

3.5 光纤通信的功能器件

光纤通信系统的基本功能是将来自信源的信息可靠地发送到信宿端的相应设备,图 3.7 给出了光纤通信系统的组成框图,光纤通信的基本功能就是由各个功能器件联合来完成的。本节对光纤通信系统的各个功能器件进行介绍。

3.5.1 发送端——光源和光发送机

在光纤通信系统中,光发送机完成的功能主要是用电信号调制光源发出光载波,实现电信号到光信号的转换。光发送机的关键器件是光源,光源用于产生特定波长的光信号。现在的光纤通信系统中常用的两类光源是半导体激光器(LD)和发光二极管(LED)。

1. 光源的发光机理

半导体激光器和发光二极管的发光区都是由 III-V 族半导体材料构成的 PN 结组成。

(1) 半导体材料

半导体材料是导电性能介于导体和绝缘体之间的材料,其导电性能由其原子结构决定。如典型的 IV 族元素硅和锗,如图 3.23 所示,其原子最外层有 4 个电子(即价电子),两个相邻原子之间有一对电子形成共价键,从而使得原子结合在一起构成共价键晶体。如果共价键中的价电子获得足够的能量,它就能挣脱共价键的束缚,成为自由电子,同时在共价键上留下一个缺位,称为空穴。电子和空穴被统称为载流子,半导体依靠这两种载流子的移动来导电。

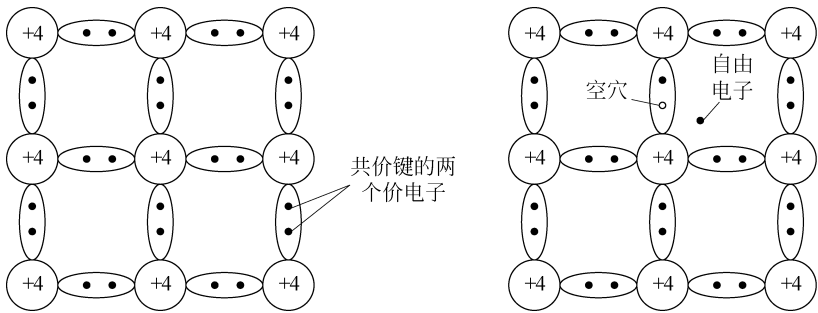


图 3.23 硅或锗晶体的共价键结构

(2) PN 结

化学成分纯净、结构完整的半导体称为本征半导体,在本征半导体中掺入微量的杂质形成的半导体,称为杂质半导体。根据掺杂元素的性质,可分为 N 型半导体和 P 型半导体。在四价的本征半导体硅、锗中掺入微量的五价杂质元素,每个杂质原子可以提供一个自由电子,形成电子型半导体,称为 N 型半导体。在四价的本征半导体硅、锗中掺入微量的三价杂质元素,每个杂质原子可以提供一个空穴,形成空穴型半导体,称为 P 型半导体。将一块半导体的两侧分别掺杂形成 P 型和 N 型半导体,在两种半导体的交界面处,由于载流子的扩

散和漂移活动,会形成一定宽度的 PN 结。

(3) 能级和能带

自然界中的一切物质都是由原子组成的。根据英国物理学家卢瑟福提出的原子结构模型,原子的质量几乎全部集中在直径很小的原子核,电子在原子核外绕核作轨道运动。电子运动所处的不同轨道之间是不连续的,离原子核较近的轨道对应的能量较低,离原子核较远的轨道所对应的能量较高,原子内部的这些离散的能量差异可表示为原子的不同能级。

在半导体材料中,大量原子相互靠近形成晶体时,由于晶体内部电子共有化运动,使得孤立原子中离散的能级组成有一定宽度的带,称为能带。在半导体材料中,价电子占据的能带称为价带,是电子能够允许存在的最低能带,电子允许占据的较高能带称为导带,晶体能带结构如图 3.24 所示。在低温下,纯晶体的价带充满电子,导带完全没有电子,导带和价带之间不允许电子填充,所以称为禁带,其宽度称为禁带宽度,用 E_g 表示,单位为电子伏[特](eV)。当温度上升时,将有部分电子从价带顶部被激发到导带底部,结果价带产生空穴,导带产生电子,称为载流子的产生。如果导带电子跃迁回价带,结果一对载流子消失,称为载流子的复合。

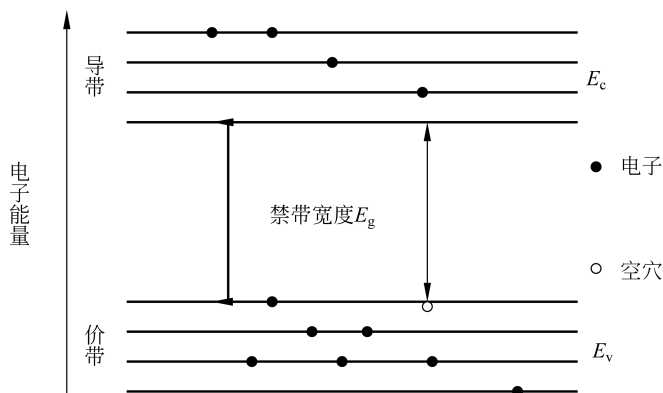


图 3.24 晶体能带结构图

(4) 光与物质的相互作用

通常情况下,原子中总是表现出绝大多数电子处在能量较低的基态能级上,只有极少的一些电子处于能量较高的激发态。当原子与外部有光能量交互时,处于基态能级的电子可以吸收光子跃迁到激发态,也可以从激发态跃迁回基态能级并释放光子。爱因斯坦于 1917 年发表了关于辐射的量子理论的论文,将光与物质的相互作用分为三种物理过程:自发辐射、受激吸收和受激辐射。

对于半导体晶体,在外来光子激励下,低能级价带上的电子吸收外来光子能量,从价带跃迁到高能级导带,变成自由电子的过程,即为受激吸收过程。处于高能级的电子状态是不稳定的,它将自发地从高能级导带跃迁到低能级价带上与空穴复合,同时释放出一个光子,该过程称为自发辐射。处于高能级的电子,在受到外来光子的激励时,从高能级跃迁到低能级与空穴复合,同时释放出一个与外来光子同频率、同相位和同传播方向的光子,这种辐射过程称为受激辐射。这三种过程如图 3.25 所示。需要注意的是,根据能量守恒定律,这三

种过程中吸收或辐射光子的能量为高能级 E_2 和低能级 E_1 的能量差 $E = hf = E_2 - E_1$, 其中 f 为光波频率, h 为普朗克常数, $h = 6.63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ 。

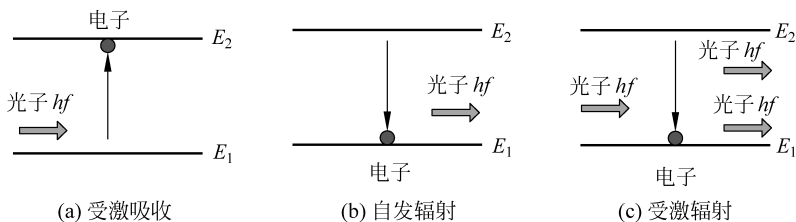


图 3.25 光与物质的相互作用的三种物理过程

在半导体材料 PN 结上外加正向电压, 可以使得 PN 结上高能带的自由电子数量大于低能带上的电子数量, 实现粒子数反转分布。发光二极管的 PN 结形成粒子数反转分布后, 产生自发辐射的光输出; 半导体激光器的 PN 结两侧有谐振腔, 外加正向电压形成粒子数反转分布后, 在 PN 结两侧的谐振腔作用下, 产生受激辐射的光输出。

2. 半导体激光器

用半导体材料做光源物质的激光器, 称为半导体激光器 (LD)。根据发光波长可以分为可见光半导体材料激光器和红外激光半导体材料激光器, 目前在光纤通信方面用得较多的是砷化镓 (GaAs) 类半导体材料。

(1) 半导体激光器的结构

半导体激光器的核心部分是一个高度掺杂的 PN 结。PN 结的两端是按晶体的天然晶面剖开的两个平行的解理面, 构成一个法布里-帕罗 (F-P) 谐振腔。对 PN 结外加正向电压后, 高能带中的电子密度增加, 这些电子的自发辐射形成激光器中初始的光子, 在这些光子的作用下, 受激辐射和受激吸收过程同时发生, 但当高能带中的电子密度增大到一定程度后, 受激辐射占主导地位, PN 结成为对光有放大作用的区域, 称为有源区。但是激光器初始的光子来源于自发辐射, 频谱较宽, 方向也杂乱无章, 只有借助 F-P 谐振腔的反射面作用, 才能通过稳定振荡形成谱线很窄的相干光束。因此, 半导体激光器的基本组成结构包括半导体激光物质、光学谐振腔和电源激励系统。图 3.26 给出了一个典型的半导体激光器的结构示例。

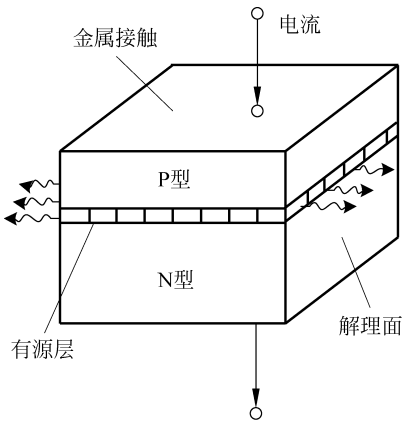


图 3.26 F-P 半导体激光器的结构

(2) 半导体激光器的工作特性

由前述可知, 只有当外部电源激励超过某一临界值, 使得 PN 结中的粒子数反转达到一定程度, 才能使得受激辐射超过受激吸收占据主导地位, 激光器才能产生激光, 这个外部电源临界值称为激光器的阈值, 一般用阈值电流 I_{th} 来描述。激光器的输出特性曲线如图 3.27 所示。

激光器是有工作波长范围的,并不能发出任意波长的激光。半导体激光器的发射波长取决于导带的电子跃迁到价带时所释放的能量,这个能量近似等于禁带宽度 E_g (eV),即有 $E_g = hf$,根据频率和波长的关系式,可得

$$\lambda = \frac{hc}{E_g} \quad (3.16)$$

式中, h 为普朗克常数; $h = 6.63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$; 光速 $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$; $1 \text{ eV} = 1.6 \times 10^{19} \text{ J}$ 。

不同的半导体材料有不同的禁带宽度,因而有不同的发射波长,一般钾铝砷-钾砷 (GaAlAs-GaAs) 材料适用于 850nm 波段,钢钾砷磷-钢磷 (InGaAsP-InP) 材料适用于 1300~1500nm 波段。

(3) 半导体激光器的类型

激光器的光学谐振腔内可能存在的电磁场本征状态称为腔的模式,可分为两种状态:纵模和横模。横模是指垂直于光轴的横截面上的光强分布,纵模是沿光轴方向的驻波分布。谐振腔内每一个允许的频率值,在腔内形成一系列驻波,每列驻波代表腔内光场沿纵轴的一种分布,习惯上称它为一个纵模。

根据纵模的数量,半导体激光器可以分为多纵模 (MLM) 激光器和单纵模 (SLM) 激光器。多纵模激光器就是存在多个纵模同时工作的激光器,前述的最常见的 F-P 腔 InGaAsP 激光器就是典型的多纵模激光器。单纵模激光器是只有一个纵模能工作,其他形式的纵模都受到抑制的激光器,可以分为分布反馈 (DFB) 激光器、分布布拉格反射 (DBR) 激光器、量子阱 (QW) 激光器等,如图 3.28 所示。

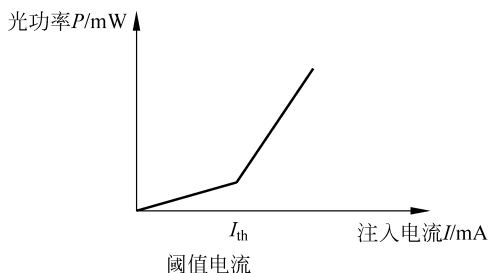


图 3.27 半导体激光器的输出特性曲线

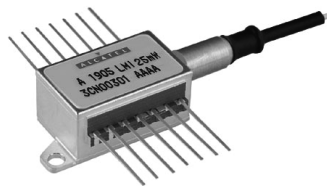


图 3.28 商用化(封装)激光器示例

3. 发光二极管

发光二极管 (LED) 的发光原理与半导体激光器类似,只是其没有谐振腔,产生的不是受激辐射光而是自发辐射光。LED 发光的光谱范围较宽,是低相干光源,相比半导体激光器而言具有发光效率低、输出功率小、调制带宽较低(约数百兆赫)和输出谱宽较宽(可达 20~100nm)等特点。LED 的主要优点是结构简单、价格便宜、线性响应较好、可靠性高且对温度不敏感、不需要制冷器,因此一般适用于中低速短距离光纤通信系统。

发光二极管可以分为面发光型 (SLED) 和边发光型 (ELED) 两种,其结构图和示意图如图 3.29 所示。SLED 高温下可靠性高、价格便宜,与光纤的对准较为容易,缺点是输出功率较低,难以满足长距离传输时的光功率要求。ELED 结构与激光器类似,性能介于 SLED 和 LD 之间。

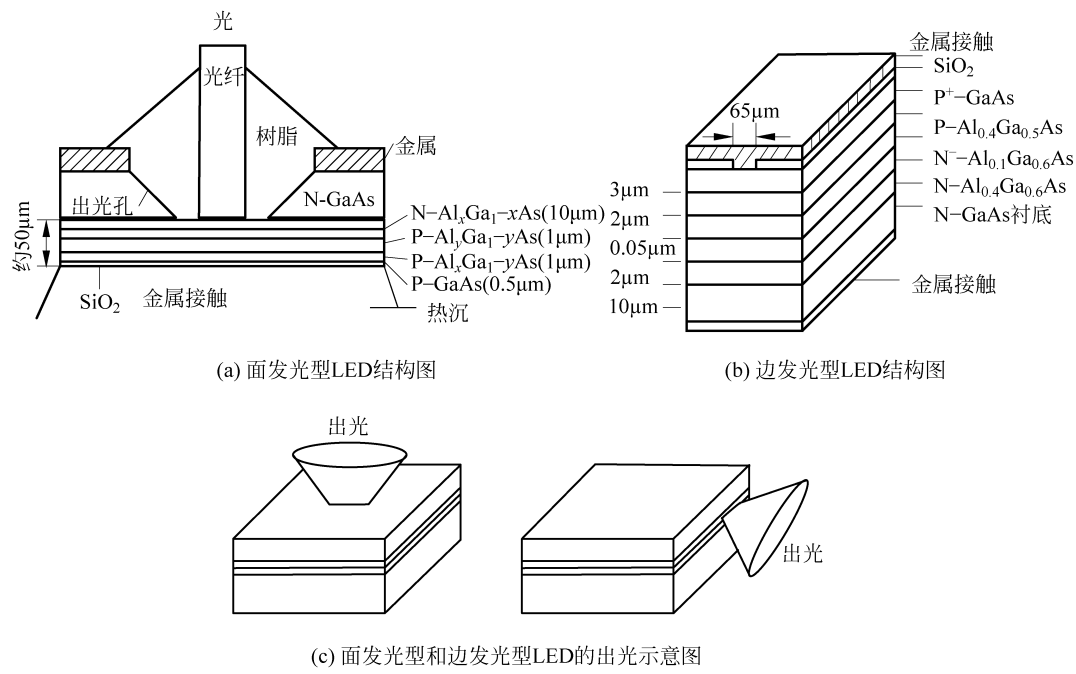


图 3.29 两种发光二极管结构

一个典型 LED 的 $P-I$ 曲线如图 3.30 所示,与半导体激光器的 $P-I$ 特性相比,LED 的输出光功率基本上随正向驱动电流而线性增加,没有阈值。但 LED 的 $P-I$ 曲线不是理想的线性曲线,在注入电流较小时,曲线基本上是线性的,当注入电流较大时,由于 PN 结的发热会出现饱和现象。

4. 光发送机

光发送机的作用是产生适合于在光纤中传送的光信号,所以必须有发光的光源,为了使这种光信号携带所要通信的信息,还要控制电信号来调制光源,产生一个已调光。因此,光通信中的光发送机一般由光源、驱动电路、调制器、控制电路等构成,其核心是光源及驱动电路。

光通信中的光发送机一般是数字发送机,即用数字信号调制光源,产生“0”“1”光脉冲序列。数字光发送机的构成组件可以分为两部分:输入电路和光发送电路。输入电路由输入接口电路与线路码型变换电路组成,将输入的信号(如 PCM 脉冲)进行整形,变换成适于光纤传送的码型后送入驱动电路。光发送电路包括驱动电路、光源、调制器、控制电路等,主要作用是用经过线路编码的电信号对光源进行调制,完成电-光变换,并从光源输出光信号耦合入光纤线路进行传输。图 3.31 给出了数字光发送机的一般构成框图。

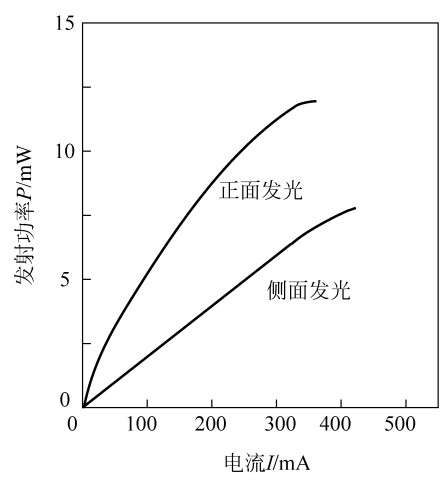


图 3.30 LED 的 $P-I$ 特性曲线

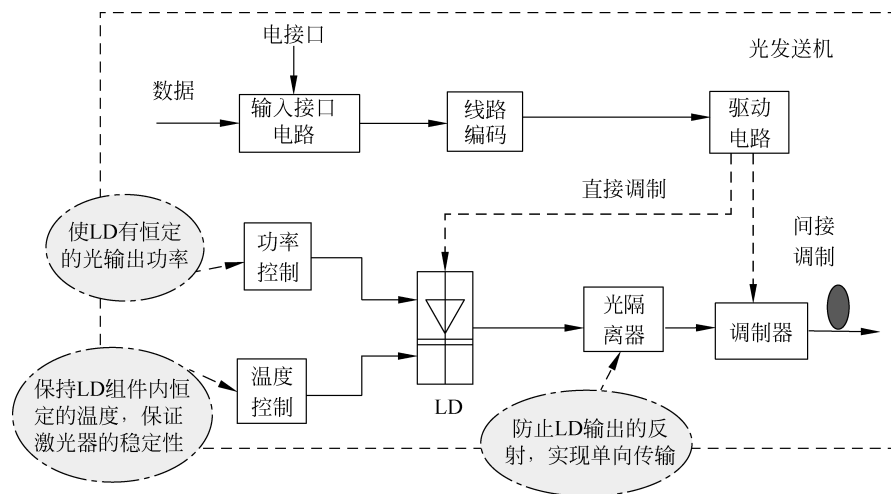


图 3.31 数字光发送机的一般构成框图

由前文可知,激光器的输出光功率特性受到阈值电流 I_{th} 的限制,只有当激励电流超过 I_{th} 时,激光器才能产生较高的输出光功率。而随着温度升高、使用时间变长,激光器的阈值电流 I_{th} 受到温度、时间老化特性等的影响会逐渐提高,从而导致输出光功率降低。为了稳定激光器的输出光功率,通常采取两种措施:温度控制和自动功率控制。因此,光发送机中需要有自动温度控制系统、自动功率控制系统等。

用驱动电路的输出电信号对光源进行调制,使光源发出的光脉冲携带信息的过程,可以有两种实现方式:直接调制和间接调制。直接调制是用激光器驱动电路产生的调制电流,来控制激光器输出的光强度,使光脉冲序列携带系统所要传输的信息。间接调制是使用外部调制器,对光源发出的稳定激光进行调制,可以利用晶体的光电效应、磁光效应和声光效应等性质来实现。

3.5.2 接收端——光检测器和光接收机

光信号在光纤线路中传输时,不仅会受到损耗的影响而造成幅度衰减,同时光纤色散和非线性效应等可能会引起脉冲波形展宽,由此造成信号质量下降。光接收机的主要作用是将经光纤传输后幅度被衰减、波形被展宽的微弱光信号转变为电信号,并经放大、均衡、判决后恢复出所传输的原始信息。光接收机的性能直接影响光纤通信系统的传输距离、通信质量等,是光纤通信系统中的关键模块。

光检测器是光接收机的核心器件,承担将微弱光信号转换为电信号的任務。目前在光纤通信系统中广泛采用的是半导体光检测器,其基本结构是反向偏置的 PN 结,主要有两种实现结构: PIN 光电二极管和雪崩光电二极管 APD。

1. 光-电转换原理

光电二极管的基本结构是半导体 PN 结,在 PN 结的分界面上,电子和空穴的扩散形成了内部自建场,自建场的存在使电子和空穴产生了与扩散方向相反的漂移运动。有自建场的区域称为耗尽区,在耗尽区两侧的 P 和 N 型半导体中电场基本为零,称为扩散区。

当光入射在 PN 结上时,如果入射光子的能量大于半导体的禁带宽度 E_g ,会发生受激

吸收现象,即价带的电子吸收光子能量,跃迁到导带形成光生电子,在价带形成光生空穴,光生电子和光生空穴统称为光生载流子。耗尽区中形成的光生载流子在自建场的作用下,空穴向P区方向运动,电子向N区方向运动,形成漂移电流。在扩散区内产生的电子-空穴对,少数会通过扩散进入耗尽区,在电场作用下形成和漂移电流方向相同的扩散电流。因此,把PN结的外电路构成回路,外电路中会形成光生电流,包含漂移电流和扩散电流两种分量。当入射的光信号发生变化时,光生电流随之作线性变化,从而把光信号转变成了电信号,实现光-电转换,如图3.32所示。

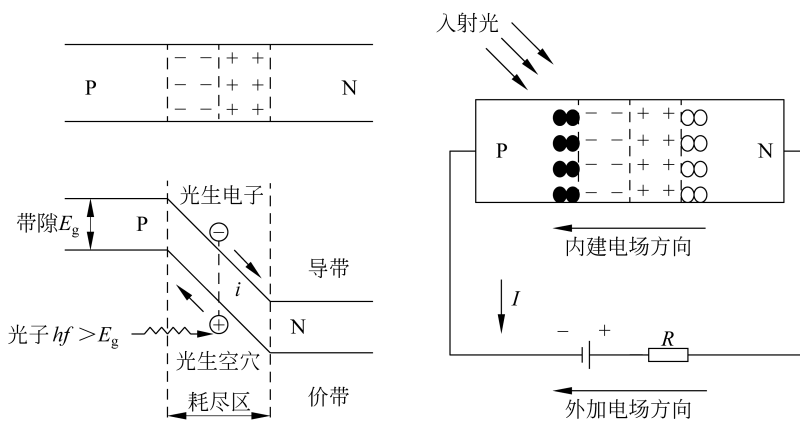


图 3.32 光电二极管中 PN 结的光-电转换原理

2. PIN 光电二极管

PIN 光电二极管,是在普通 PN 结光电二极管的 P 区和 N 区中间,插入一层低掺杂的纯度接近于本征半导体的 I 层。如果 I 层为低掺杂的 P 型半导体,则该二极管可称为 π 型 PIN 二极管;如果 I 层为低掺杂的 N 型半导体,则该二极管可称为 ν 型 PIN 二极管。在 PIN 光电二极管中,P 层和 N 层通常由高掺杂的半导体材料组成。

由于 I 层较厚,PIN 光电二极管通常比普通的二极管拥有更宽的耗尽层。绝大部分的入射光在 I 层内被吸收并产生大量的电子-空穴对,而在 I 层两侧是掺杂浓度很高的 P 型和 N 型半导体,P 层和 N 层很薄,吸收入射光的比例很小。因而光生电流中漂移分量占了主导地位,这就大大加快了响应速度。图 3.33 给出了 PIN 光电二极管的结构原理图和实物图片。

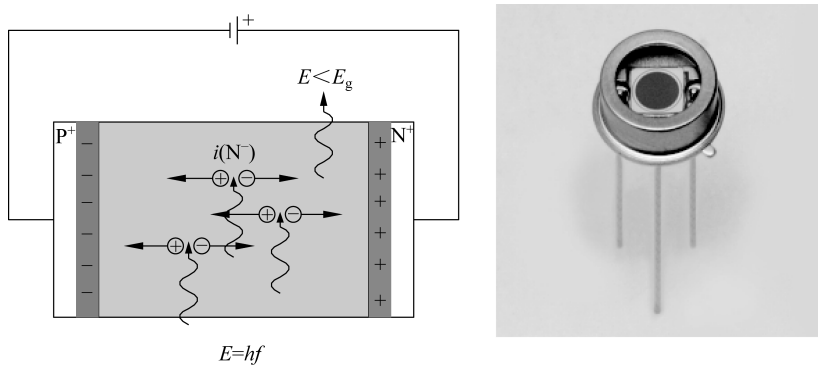


图 3.33 PIN 光电二极管的结构原理图(左)和实物照片(右)

3. 雪崩光电二极管 APD

雪崩光电二极管(APD)是利用雪崩倍增效应实现内部电流增益的半导体光电检测器。APD的雪崩倍增效应是通过在PN结上加高反向偏压(数十伏乃至数百伏),从而在PN结附近形成强电场实现的;耗尽层内产生的光生载流子在强电场作用下得到加速,获得很高的动能,与半导体晶体内的原子相碰撞。碰撞的结果使得束缚在价带中的电子获得能量并激发到导带,产生第二代电子-空穴对(载流子),实现碰撞电离。第二载流子在强电场的加速下可以再次引起碰撞电离而产生第三代载流子,如此反复循环使得载流子数量如雪崩似的急剧增加,从而使光电流在光电检测器内部获得倍增。

APD的内部电流增益系数用雪崩增益 G 来描述。APD雪崩倍增后输出电流 I_M 和初始光生电流 I_p 的比值,定义为雪崩倍增因子 g ,其平均值称为雪崩增益 G 。雪崩倍增过程是一个随机过程,每一个电子-空穴对与半导体晶体内的原子碰撞电离产生的初始电子-空穴对的数目是随机的,因而雪崩倍增因子 g 也是随机变化的,一般用雪崩增益 G 来描述APD的特性。

4. 光电检测器的特性参数

(1) 截止波长和吸收系数

根据前文光电转换原理可知,只有入射光子的能量 hf 大于半导体材料的禁带宽度 E_g ,才会发生受激吸收现象产生光生载流子,进而形成光生电流。因此,对一种特定材料的半导体光电二极管,存在着一个下限截止频率 f_c 和相应的上限截止波长 λ_c ,满足

$$E_g = hf_c = \frac{hc}{\lambda_c} \quad (3.17)$$

式中, h 为普朗克常数, c 为光速。只有波长小于 λ_c 的光才能用由这种材料做成的器件来检测。

入射到半导体材料的光信号,在材料中其功率按指数律衰减,设半导体表面的光功率为 $P(0)$,则半导体深度为 d 处的光功率 $P(d)$ 可表示为

$$P(d) = P(0)\exp(-\alpha d) \quad (3.18)$$

式中的 α 定义为半导体材料对光的吸收系数。半导体的吸收系数随着入射光波长的减小而变大,因此光波长很短时,即光频率较高时,光在半导体表面就被吸收殆尽,使得光电转换效率很低,这限制了半导体光电检测器在较短波长上的应用。

因此,要检测某个波长的入射光信号,必须选择由适当材料做成的光电检测器。一方面入射光波长要小于由材料的禁带宽度决定的截止波长,否则材料对光透明,不能进行光电转换;另一方面,入射光波长对应的吸收系数不能太大,以免降低光电转换效率。

(2) 响应度和量子效率

响应度和量子效率是表示光电二极管能量转换效率的参数。假设入射光功率为 P_0 时产生的光电流为 I_p ,则响应度 R_0 和量子效率分别定义为

$$R_0 = I_p / P_0 \quad (\text{A/W}) \quad (3.19)$$

$$\eta = \frac{\text{光电转换产生的电子-空穴对数}}{\text{入射光子数}} = \frac{I_p / e}{P_0 / hf} = \frac{I_p}{P_0} \frac{hf}{e} \quad (3.20)$$

式中, e 为电子电量; h 为普朗克常数; f 为入射光频率。

需要注意的是,在雪崩倍增二极管APD中,由于光生电流被倍增了 G 倍,所以APD的

响应度比 PIN 光电二极管提高了 G 倍。而因为量子效率只与初始载流子数目有关,与倍增系数无关,所以不管是 PIN 光电二极管还是 APD,它们的量子效率总是小于 1。

5. 光接收机

光接收机的任务是以最小的附加噪声及失真,将经光纤线路传输后的微弱畸变光信号进行光电变换,然后经过放大、整形、判决等,恢复出原始信息。以数字光接收机为例,其组成框图如图 3.34 所示。

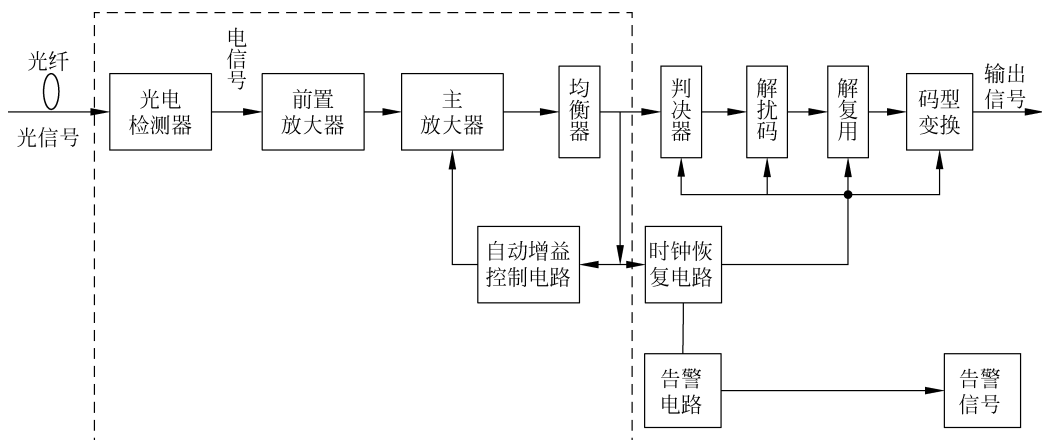


图 3.34 数字光接收机的组成框图

(1) 组成结构

光接收机主要由接收电路和判决电路两部分组成。光接收电路由光电检测器、前置放大器、主放大器、自动增益控制和均衡电路等组成。判决电路由判决器、时钟恢复电路和解码器等组成。

光接收机的整个信号流程如图 3.34 所示。光电检测器把外来光信号转换为电信号,送入前置放大器,这一级的噪声对整个电信号的放大影响较大。主放大器的作用是提供足够增益,将信号放大到判决电路所需要的电平;同时放大器增益受到 AGC 自动增益控制电路的控制,使输出信号的幅度在一定范围内不受输入信号幅度的影响。均衡器的作用是保证均衡以后的波形有利于判决,尽量减小码间干扰。判决器和时钟恢复电路对信号进行再生,然后通过解扰码、解复用、码型变换等,将光发送机为了更好通信而对信号做的一系列处理反变换回来,使信号恢复到和光发送机输入端输入的电信号一样。

(2) 光接收机的误码

在数字光纤通信系统中,传输的是由“0”和“1”组成的二进制光脉冲信号,这是一种单极性码,光功率在“接通”(即“1”码)和“断开”(即“0”码)两个电平上变动。光接收机对收到的微弱信号进行转换、放大、滤波,然后送入判决电路,判决电路把每个码元的信号与判决电平进行比较,如果接收信号大于判决电平,则认为收到的是“1”码,反之则为“0”码,最后恢复出发送端的信息。数字信号传输过程中由于叠加噪声及波形失真等原因,会令原来发送的“1”码,在接收判决时被误判为“0”码,原来发送的“0”码,可能被误判为“1”码,产生误码,如图 3.35 所示。

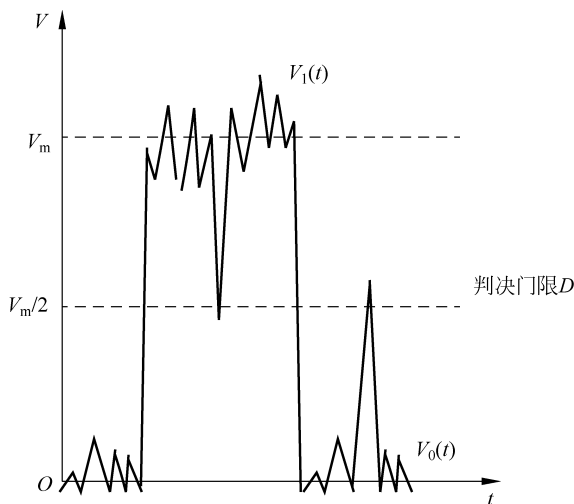


图 3.35 判决点上的噪声电压影响

光接收机的误码由比特误码率(BER)表示,比特误码率定义为码元在传输过程中出现差错的概率,工程中常用一段时间内出现误码的码元数与传输的总码元数之比来表示。例如, $\text{BER}=10^{-6}$,表示每传输百万比特允许错 1b。光接收机的误码主要由散粒噪声、倍增噪声、热噪声等综合的总噪声引起。光接收机的噪声是与信息无关的随机变化量,光接收机的各个器件工作时都会引入噪声。

(3) 光接收机的性能指标

光接收机的主要性能指标包括接收机灵敏度、动态范围、过载功率、误码率、信噪比、Q值等,其中灵敏度和动态范围是光接收机的关键指标。

(4) 灵敏度

光接收机的灵敏度可以用给定的误码(如 10^{-9})指标条件下可靠工作所需要的最小平均光功率 $P_{\min}$ 来表示。当入射光功率 P 大于 $P_{\min}$ 时,系统的误码率 $\text{BER}<10^{-9}$,能可靠地工作;当入射光功率 P 小于 $P_{\min}$ 时,误码率较大,不能正常工作。换句话说,某一光接收机能在较低的入射功率下,达到同样的性能指标,该接收机就比较灵敏。

最小平均光功率 $P_{\min}$,单位为瓦(W)。工程上,光接收机的灵敏度常用最小平均光功率相对值来表示,单位是分贝毫瓦(dBmW)。二者的换算关系为

$$S_t = 10 \lg \frac{P_{\min}}{1 \text{ mW}} \quad (3.21)$$

(5) 动态范围

光接收机的动态范围表征的是光接收机适应输入信号变化的能力,定义为在保证系统的误码率指标要求下,光接收机最低输入光功率 $P_{\min}$ 和最大允许光功率 $P_{\max}$ 之间的变化范围,也即光接收机灵敏度和过载功率之间的差值。动态范围用 D 来表示,一般在工程上用二者分贝值的差值来表示。一台较好的光接收机应有较宽的动态范围。

$$D = 10 \lg \frac{P_{\max}(\text{mW})}{1(\text{mW})} - 10 \lg \frac{P_{\min}(\text{mW})}{1(\text{mW})} = 10 \lg \frac{P_{\max}}{P_{\min}}(\text{dB}) \quad (3.22)$$

3.5.3 中转站——光电中继器和光放大器

一般情况下,一个光纤通信系统具备了光发送机、光接收机和光纤以后,就可以进行光通信了。但是光发送机输出的光脉冲信号,经过光纤传输后,因光纤的吸收和散射而产生能量衰减,又因光纤材料和结构产生色散失真,这些都限制了通信的传输距离和传输码速。因此,为了补偿光信号的衰减,对波形失真的脉冲进行整形,从而延长光纤通信距离,必须在传输线路中每隔一定距离设置一个中继设备。

常用的中继设备有两种,一种是传统的光电中继器,采用光-电-光的处理方式,对信号进行放大和整形;另一种是光放大器,对光信号进行直接放大。

1. 光电中继器

光电中继器采用背靠背的光-电-光转换方式,包括光-电转换、再生判决和电-光转换,可以认为是前面讲过的光接收机和光发送机功能的串接。光电中继器的基本功能是均衡放大、识别再生和再定时,具有这三种功能的中继器称为 3R 中继器,而仅具有前两种功能的中继器称为 2R 中继器。一个功能最简单的光电中继器的结构框图,如图 3.36 所示。这种中继方式针对不同的比特率和信号格式需要不同的中继器,而且每一个信道需要一个中继器,设备复杂,成本较高。光电中继器是通过再生信号来改善传输质量的,因此对信号整形能力较好,适用于有色散限制的光通信系统。

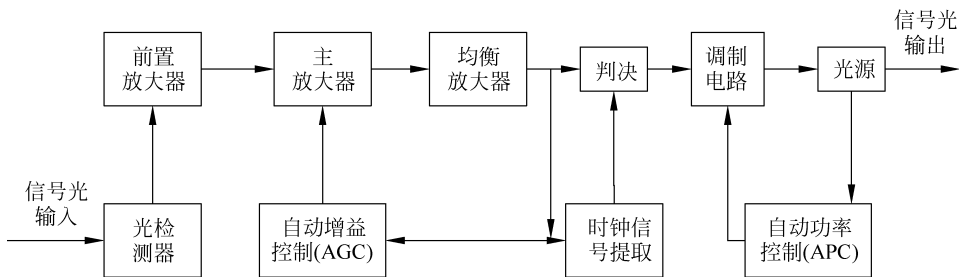


图 3.36 光电中继器的结构框图

2. 光放大器

光放大器是一种能在保持光信号特征不变的条件下,增加光信号功率的有源设备,其放大过程直接在光域内完成,对不同的码率和格式透明,成本相对低廉,但对信号整形能力较差。光放大器的基本工作原理是受激辐射或受激散射效应,通过将泵浦能量转变为信号光的能量实现放大作用。

(1) 光放大器的分类

光放大器主要可以分为两类:半导体激光放大器和光纤放大器。

半导体放大器是由半导体材料制成的,其基本原理是利用受激辐射对进入增益介质的光信号进行直接放大,其结构相当于一个处于高增益状态下的无谐振腔的半导体激光器。

光纤放大器是直接在水晶纤维结构中对光信号进行放大,根据放大机理的不同,分为掺稀土元素放大器和非线性效应放大器。掺稀土元素放大器主要是利用铒和镨等元素对光纤进行掺杂,通过外部泵浦光激励实现粒子数反转形成输入信号光的放大;非线性效应放大器是利用强激励注入光纤,在光纤中产生显著的非线性效应来对输入光信号进行放大。

光放大器的分类可归纳为如图 3.37 所示。其中半导体光放大器、掺铒光纤放大器和光纤拉曼放大器技术比较成熟,图 3.38 展示了一款行波式半导体光放大器的实物产品。

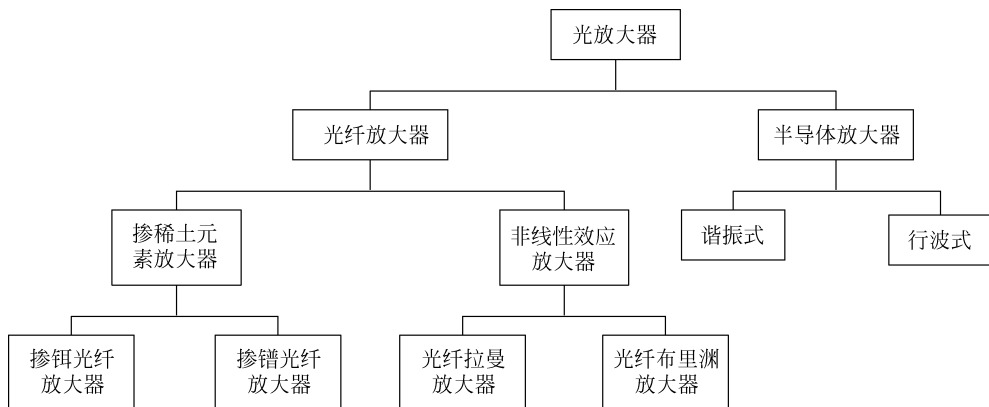


图 3.37 光放大器类型

(2) 光放大器的应用

图 3.39 给出了光放大器的三种基本应用类型:在线光放大器、前置放大器和功率放大器。

① 在线光放大器。在单模光纤中,光纤色散的影响较小,限制中继距离的主要因素是光纤损耗,此时不一定需要信号的完全再生,简单的光信号放大就足够了。因此,在线光放大器可以用来补偿传输损耗并且扩大再生中继器间的距离,如图 3.39(a)所示。

② 前置放大器。前置放大器是用在光接收机之前,将光纤上的微弱光信号进行放大,可以抑制在接收机中由于热噪声引起的信噪比下降。用作前置放大器时,要求光放大过程中引入的噪声比较小。如图 3.39(b)所示。

③ 功率放大器。功率放大器应用是指在光发送机之后安装的放大器,以提高发送功率,如图 3.39(c)所示。根据放大器增益和光纤损耗,传输距离可以增加 10~100km,如果与接收端光前置放大器同时使用,可以达到 200~250km 的无中继海底传输。也可以在局域网中用光放大器补偿耦合的插入损耗和功率分配损耗,如图 3.39(d)所示。



图 3.38 行波式半导体光放大器

3. 掺铒光纤放大器(EDFA)

铒是一种稀土元素,在制造光纤时掺入一定量的铒离子形成掺铒光纤,使用激励光源对掺铒光纤进行泵浦激励,可以使输入光纤的光信号得到放大,这种放大器称为掺铒光纤放大器(EDFA)。EDFA 是率先商用化的光放大器之一,由于具有增益高、噪声低、输出功率高、工作波长处于 1550nm 的光纤最小损耗区等优点,已经成为高速大容量光纤通信系统中不可缺少的部分。

光纤放大器中用来作为激励的光源称为泵浦光源,它所发出的激励光称为泵浦光。EDFA 中的铒离子会吸收泵浦光的能量,从基态能带向高能带跃迁,在高能带铒离子处于不稳定的状态,于是以非辐射跃迁的形式不断向亚稳态能带汇聚,从而实现粒子数反转。可以使用 980nm 和 1480nm 的泵浦光对 EDFA 进行激励,使得铒离子处于亚稳态能带上,当具

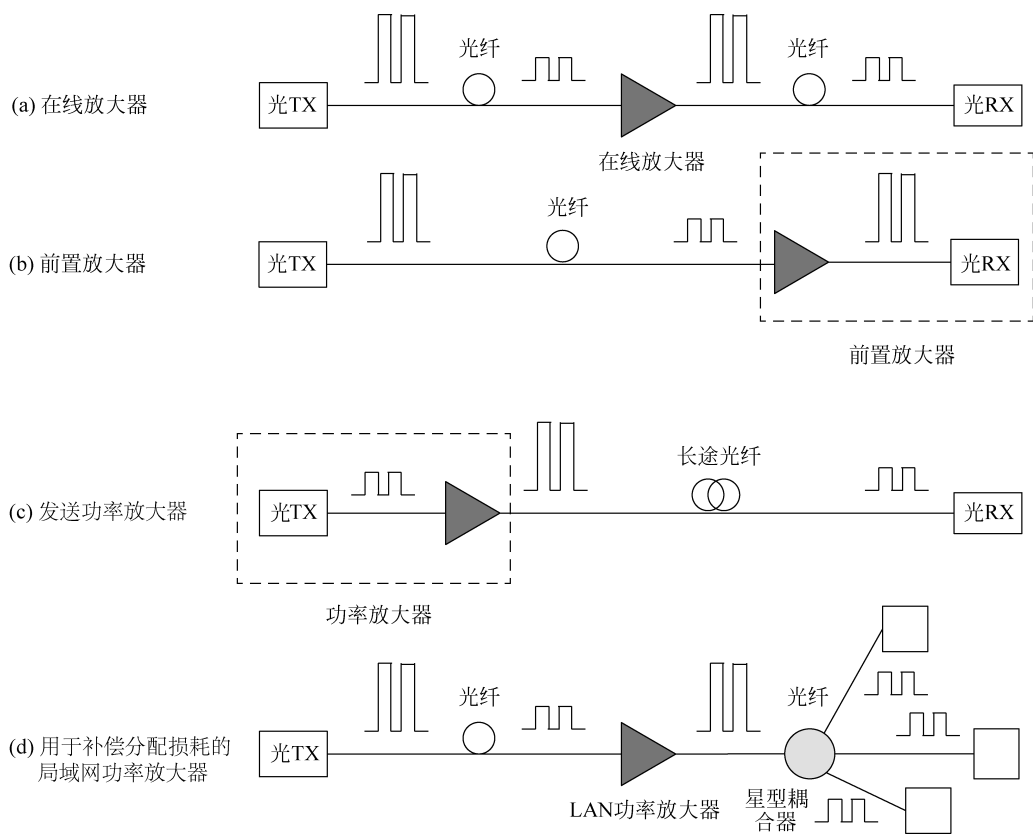


图 3.39 光放大器的三种应用

有 1550nm 波长的光信号通过这段掺铒光纤时,亚稳态的铒离子以受激辐射的形式跃迁到基态,并产生和入射光信号中的光子一模一样的光子,从而实现光信号的放大。

EDFA 主要由掺铒光纤、泵浦光源、耦合器、隔离器等组成,其结构组成如图 3.40 所示。其中掺铒光纤是一段长度为 10~100m 左右的掺铒石英光纤;泵浦光源一般采用工作波长为 980nm 或 1480nm 的半导体激光器;光耦合器的作用是将信号光和泵浦光混合在一起;隔离器的作用是保证信号单向传输,防止和降低光反射对光放大器稳定工作的影响。

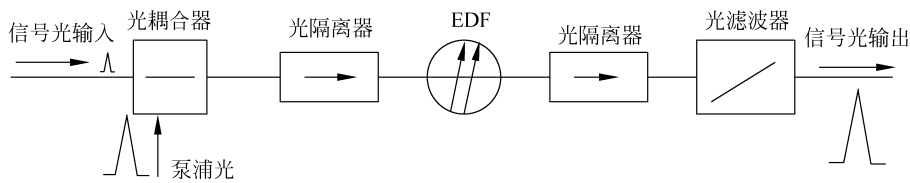


图 3.40 掺铒光纤放大器的基本组成

4. 光纤拉曼放大器(FRA)

EDFA 是使用最为广泛的光纤放大器,技术比较成熟,但是由于铒离子禁带宽度的限制,EDFA 只能工作在 1530~1564nm 之间的 C 波段,仅覆盖石英单模光纤低损耗窗口的一部分。光纤拉曼放大器(FRA)对光信号的放大是利用了受激拉曼散射效应,其增益频谱由

泵浦波长决定,可以工作在全波光纤工作窗口。拉曼散射效应在所有类型的光纤上都存在,与各类光纤系统具有良好的兼容性,且成本较低。

与 EDFA 利用掺铒光纤作为增益介质不同,FRA 利用系统中的传输光纤作为增益介质。FRA 的工作原理是基于石英光纤中的受激拉曼散射效应,受激拉曼散射将一小部分入射功率由一光束转移到另一频率下移的光束,频率下移量由介质的振动模式决定。FRA 利用强泵浦光通过光纤传输时产生受激拉曼散射,使组成光纤的石英晶格振动和泵浦光之间发生相互作用,产生比泵浦光波长更长的散射光,该散射光与要放大的弱信号光波长重叠,从而使弱信号光放大。

FRA 与 EDFA 相比,优势体现在以下 3 个方面。

① 采用拉曼放大时,放大波段只依赖于泵浦光的波长。从原理上讲,只要采用合适的泵浦光波长,就可以对任意输入光进行放大,因此 FRA 具有很宽的增益谱。

② 可以利用传输光纤本身做增益介质,因此 FRA 可以对光信号的放大构成分布式放大,实现长距离的无中继传输和远程泵浦,尤其适用于海底光缆通信。

③ 具有较低的等效噪声指数,使其与常规的 EDFA 混合使用时可大大降低系统噪声指数。

3.5.4 黏合剂——无源光器件

在光纤通信系统中,除了光源、光检测器、光放大器等有源器件外,还有许多无源器件,如“黏结剂”一样将整个光纤通信系统连接起来,如光纤连接器、耦合器、光滤波器、光开关、波分复用/解复用器等,都是光纤通信系统的重要组成部分。

1. 光纤连接器

光纤与光纤的连接主要有两种方式,一种是永久性连接,多采用熔接法实现,另一种是活动连接,即采用光纤连接器。光纤连接器是两根光纤之间完成活动连接的器件,主要用于各类有源及无源光器件之间、光器件与光纤线路之间、各类测试仪器与光纤通信系统或光纤线路间的活动连接,以便于系统的接续、测试和维护。

连接器是光纤通信系统中应用最广泛的一种无源器件。光纤连接器的使用必定会引入一定的插入损耗而影响传输性能。对光纤连接器的一般要求是插入损耗小、重复插拔的寿命长、互换性好、拆卸方便等。图 3.41 给出了两种光纤连接器的实物照片。

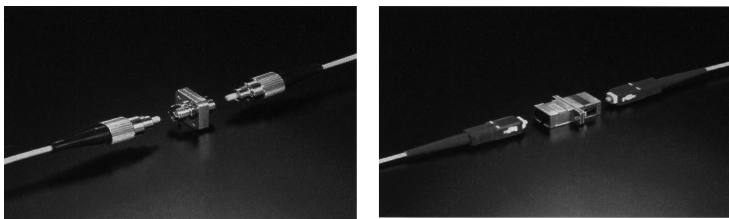


图 3.41 两种光纤连接器的实物照片

2. 光纤耦合器

光纤耦合器的功能是实现光信号的分路/合路,就是把一个输入的光信号分配给多个输出或者把多个输入的光信号组合成一个输出。根据合路和分路的光信号,可以把光纤耦合

器分为功率耦合器和波长耦合器。常用的功率耦合器包括三端口四端口光纤耦合器以及星型耦合器,如图 3.42 所示。图 3.43 给出了两种光纤耦合器的实物照片。

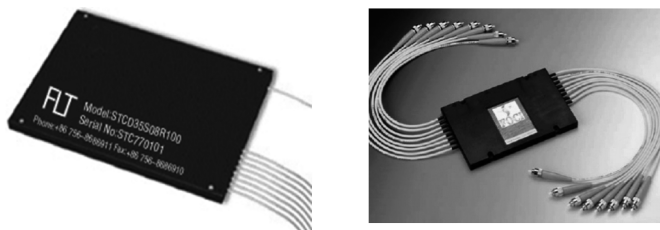
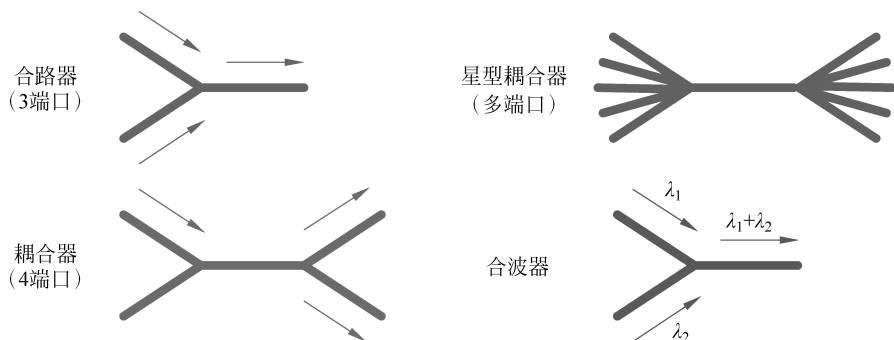


图 3.43 1/N 和 N/N 光纤耦合器实物照片

3. 光衰减器

光衰减器是一种用来降低光功率的器件,它分为可变光衰减器和固定光衰减器两种。可变光衰减器主要用于调节光线路电平,在测量光接收机灵敏度时,需要用可变光衰减器进行连续调节来观察接收机的误码率。固定光衰减器主要用于调整光纤通信线路电平,若光纤通信线路的电平太高,就需要串入固定光衰减器。图 3.44 给出了一款光纤衰减器实物照片。



图 3.44 光纤衰减器实物照片

4. 光隔离器

光隔离器是一种只允许光波往一个方向传输,阻止光波往其他方向特别是反方向传输的无源器件,主要用在激光器或光放大器的后面,以避免反射光返回导致器件性能变坏。光隔离器的主要参数是插入损耗和隔离度。对正向入射光,插入损耗越小越好,对反向反射光的隔离度则越大越好。目前隔离器的插入损耗典型值约为 1dB,隔离度的典型值约在 40~50dB 之间。

光隔离器的结构及工作原理如图 3.45 所示。光隔离器主要由起偏器、检偏器和旋光器三部分组成。起偏器和检偏器的特点是当入射光进入后,其输出光束为某一形式的偏振光,当光的偏振方向与透光轴一致时才能全部通过。旋光器由旋光材料和套在材料外面的电流圈组成,可以使通过它的光的偏振状态发生一定程度的旋转。

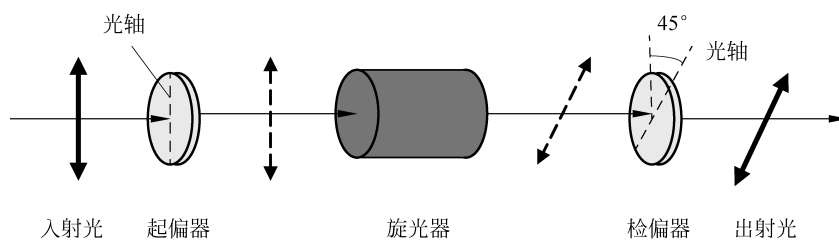


图 3.45 光隔离器的结构与原理图