

# 学习情境一

## 光纤光缆认知

人们是如何利用光信号来传递信息的呢？平常见到的太阳光与光纤通信的光一样吗？光信号是通过什么来传递的？每个初次接触光通信的人都会产生类似的问题，本学习情境将提供这些问题的答案。

本学习情境将学习光纤通信基本知识、光纤导光原理和光缆的识别等内容。

本情境学习重点

- 光纤通信系统模型
- 光纤通信使用的光波波长
- 光纤通信的特点
- 光纤导光原理
- 光缆型号识别

### 任务一 光纤通信基本知识认知

#### 【任务分析】

学习光纤通信，需要了解光纤通信的发展历程、技术特点和主要应用。本任务围绕上述内容展开，介绍了光纤通信的发展概况、光波波谱、光纤通信系统的基本构成，以及光纤通信的特点和系统分类。其中，熟悉和掌握光纤通信的光波波谱、光纤通信系统组成和分类、光纤通信的优缺点是后续学习的基础。

光纤通信是利用光波作为载波，以光导纤维作为传输媒介传递信息的有线光波通信。光纤通信除了可以用来传送声音以外，还可以传送电视图像、数据等。光纤通信应用的场合很多，除了传统通信行业外，还可以应用在计算机网络、厂矿内部通信、广播、电视、电力、铁道系统的通信等。光通信技术的进步，推动了整个信息产业的飞速发展，已成为当前远距离、大容

量信息传输的最重要的基础设施。

### 【任务目标】

- 光波波谱;
- 光纤通信的优缺点;
- 光纤通信系统的分类;
- 光纤通信系统的基本构成。

## 一、光纤通信的发展概况

光通信可追溯到我国古代 3000 多年前的烽火台,这是一种可视光通信。此后数千年间,远距离通信一直是通过目视光通信来实现的。直到现在仍然在使用的信号弹、旗语及交通信号灯等,都属于可视光通信的范畴。现代光通信起源于 1960 年,梅曼(T.H.Maiman)发明了红宝石激光器,产生了单色相干光,实现了高速的光调制。美国林肯实验室首先研制出利用氦氖激光器通过大气传输彩色电视信号的技术。但利用大气传输光信号具有以下缺点:气候严重影响通信,如雾天;大气的密度不均匀,传输不稳定;传输设备之间要求没有阻隔。

利用光导纤维作为光传输媒介的光纤通信,其发展只有三四十年的历史。1966 年 7 月,英籍华裔学者高锟博士(K.C.Kao)和霍克哈姆(C.A.Hockham)在 PIEEE 杂志上发表了一篇十分著名的文章“用于光频的光纤表面波导”,该文章从理论上分析、证明了用光纤作为传输媒体以实现光通信的可能性,并设计了通信用光纤的波导结构(阶跃光纤)。更重要的是科学地预言了制造通信用的超低耗光纤的可能性,即加强原材料提纯,加入适当的掺杂剂,可以把光纤的衰耗系数降低到 20dB/km 以下。以后的事实发展雄辩地证明了高锟博士文章的理论性和科学大胆预言的正确性,所以该文章被誉为光纤通信的里程碑,高锟博士等人也因此获得 2009 年诺贝尔物理学奖。

1970 年,美国康宁玻璃公司根据高锟博士的设想,用改进型化学相沉积法(MCVD 法)制造出当时世界上第一根超低耗光纤,成为光纤通信爆炸性竞相发展的导火索。

要实现长距离的光纤通信,必须减少光纤的衰减。高锟博士指出降低玻璃内过度金属杂质离子是降低光纤衰减的主要因素。1974 年,光纤衰减降低到 2dB/km。1976 年,通过研究发现降低玻璃内的 OH 离子含量就出现了衰减的长波长双窗口:1.3 $\mu\text{m}$  和 1.55 $\mu\text{m}$ 。1980 年,1.55 $\mu\text{m}$  波长光纤衰减达到 0.2dB/km,接近理论值。20 世纪 80 年代中期,又发现水分和潮气长期接触光纤会扩散到石英光纤内,从而使光纤衰减增大且强度降低,于是采用注入油膏于光纤套管中隔绝水汽的方法,制成高品质的光缆用于工程。

要实现大容量的通信,要求光纤有很宽的带宽。单模(Single Mode, SM)光纤的带宽最宽,是理想的传输介质。但是单模光纤纤芯很细,20 世纪 70 年代的工艺无法达到,因此,多模(Multi Mode, MM)光纤较早应用,光在多模光纤各模式间存在光程差,造成输出的光信号带宽不宽。1976 年,日本研制成渐变型(又称自聚焦型,SELFCO)光纤,光纤的带宽达到 kHz/km 数量级。20 世纪 80 年代,单模光纤研制成功,带宽增大到 10kHz/km,这一成就使大容量光纤通信成为可能。20 世纪 80 年代中期,零色散波长为 1.55 $\mu\text{m}$  的光纤研制成功,光纤通信实现了长距离且超大容量的传输。

光纤通信还要有合适的光器件。1970 年,美国贝尔实验室研制出世界上第一只在室温下连续工作的砷化镓铝半导体激光器,为光纤通信找到了合适的光源器件。后来逐渐发展到性能更

好、寿命达几万小时的异质结条形激光器和现在的分布反馈式单纵模激光器 (DFB), 以及多量子阱激光器 (MQW)。光接收器件也从简单的硅光电二极管 (PIN) 发展到量子效率达 90% 的 - 族雪崩光电二极管 (APD)。从此以后, 光纤通信在世界范围内得到迅猛发展, 20 世纪 80 年代以来, 光纤通信应用已从 850nm、1310nm、1550nm 三个低损耗波长窗口发展到全波段波长, 同时开发出许多新型光电器件, 激光器寿命已达数十万小时甚至百万小时。光纤通信逐渐普及并快速发展起来。

由于工程上的需要, 各式各样的光无源器件和光仪表也相应出现, 如光活动连接器、光衰减器、光纤熔接机和光时域反射测试仪等。

20 世纪 90 年代, 通信技术高速发展, 移动通信、卫星传输和光纤通信将通信演变为高速、大容量、数字化和综合的多媒体业务。在 ITU-T 的推动下, 光纤通信的各种标准纷纷制定, 如 PDH、SDH、DWDM、AN 和 B-ISDN 等。美国首先提出建立国家信息高速公路的构想——国家信息基础建设 (NII), 随后各国纷纷制订计划, 并推出全球的信息技术建设计划 (GII)。目前, 光纤通信朝用户方向延伸, 即所谓的光纤到路边 (FTTC)、光纤到公寓 (FTTA)、光纤到大楼 (FTTB)、光纤到家庭 (FTTH)。

FTTA、FTTB、FTTH 构成当前的光纤接入网络, 最终将实现光纤到户和光纤到桌面, 如图 1.1 所示。

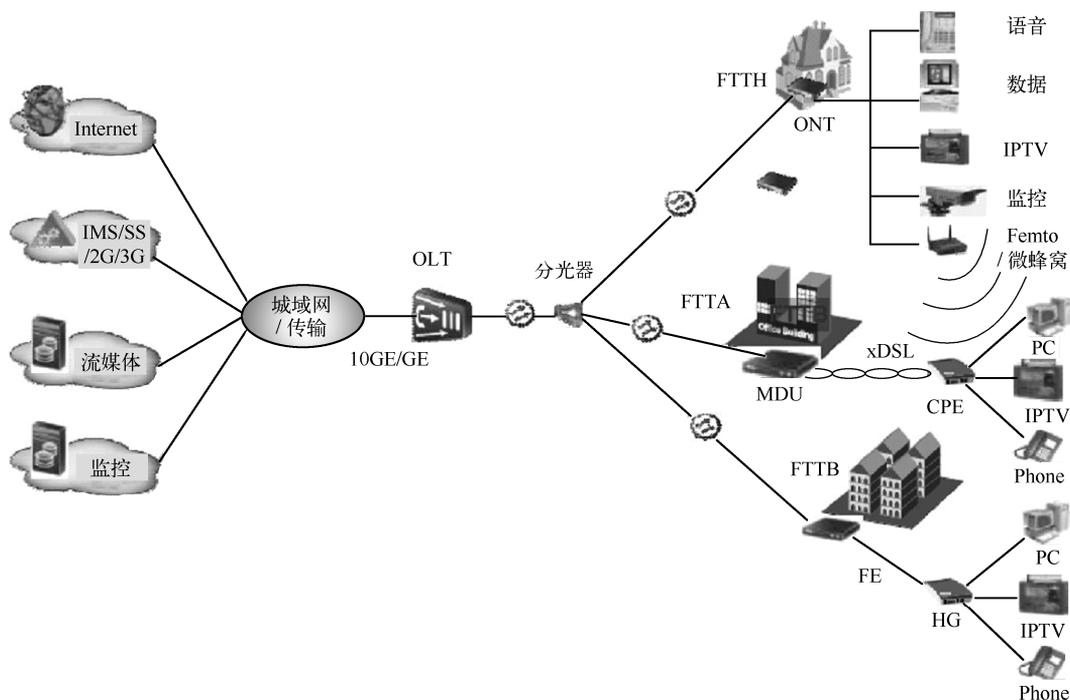


图 1.1 光纤接入网络

## 二、光波波谱

光波是电磁波, 其波长在微米级, 频率为  $10^{13} \sim 10^{14}$  Hz 数量级。一般无线电磁波可用作广播电台、电视、移动通信的信号传输, 光波也可以, 而且是大容量、高速度、数字化和综合业务的通信传输。所不同的是, 一般无线电磁波通过空气传输, 而通信用光波是通过光纤 (Optic

Fiber) 来实现传输的, 是一种有线传输。

如图 1.2 所示为光波在电磁波波谱中的位置, 可见光的波长  $0.39 \sim 0.76\mu\text{m}$ , 包括红、橙、黄、绿、蓝、靛、紫, 混合而成白光, 其中红光的波长最长。

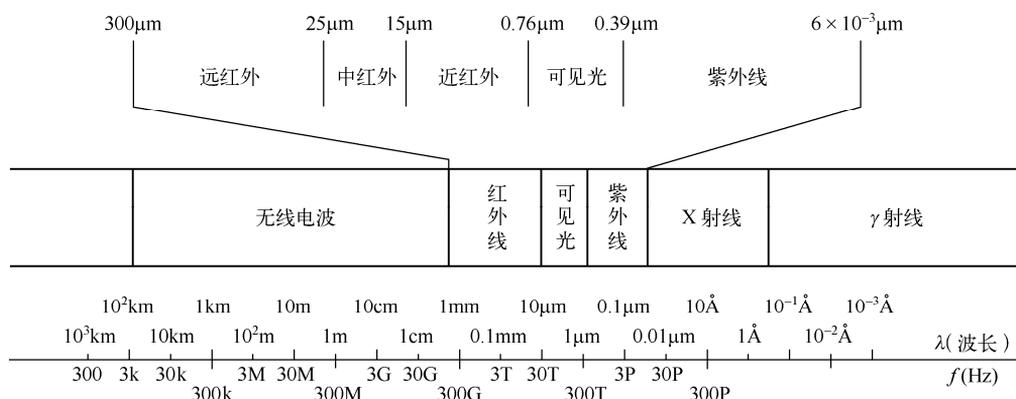


图 1.2 光波在电磁波波谱中的位置图

比红光波长更长的光波, 即波长大于  $0.76\mu\text{m}$ , 是不可见的红外线,  $0.76 \sim 15\mu\text{m}$  的光波称为近红外线,  $15 \sim 25\mu\text{m}$  的光波称为中红外线,  $25 \sim 300\mu\text{m}$  的光波称为远红外线。比紫光波长更短的光波称为不可见的紫外线, 紫外线的波长为  $0.39 \sim 0.006\mu\text{m}$ , 紫外线、可见光和红外线统称光波。

目前, 光纤使用的波长范围是在近红外线区域内。光纤通信初期, 根据光纤的本征特性, 光纤通信波长使用  $0.85\mu\text{m}$ 、 $1.31\mu\text{m}$  和  $1.55\mu\text{m}$  三个窗口。目前由于光纤技术的飞速发展, 新一代光纤已突破了三个低衰减窗口的瓶颈, 实现了全波段使用 ( $1260 \sim 1625\text{nm}$ )。光纤通信新材料和新技术的应用, 提高了光波利用率, 使光纤通信容量大幅度提高。

### 三、光纤通信系统的基本构成

所谓光纤通信, 就是利用光纤来传输携带信息的光波以达到通信的目的。数字光纤通信系统由光发射机、光纤和光接收机组成。

光发射机的作用就是进行电/光转换, 并把转换成的光脉冲信号流输入到光纤中进行传输。光源器件一般是 LED 和 LD。

光纤的作用就是完成光波的传输。

光接收机的作用就是进行光/电转换。光接收机一般是光电二极管 (PIN) 和雪崩光电二极管 (APD)。

光纤通信过程: 光发射机将已调制的光波送入光纤, 经光纤传送到光接收机。光信号经过光纤传输到达接收端, 首先经光电二极管 (PIN) 或雪崩光电二极管 (APD) 检波变为电脉冲, 然后经放大、均衡、判断等适当处理, 恢复为送入发送端时的电信号, 再送至接收电端机。它与一般通信过程所不同的有两点: 一是传输光信号; 二是利用光纤作为媒介传输手段。基本光纤通信系统组成框图如图 1.3 所示。

在光发射机中, 对电信号有两种光调制方法: 一种是在光源如激光器上调制, 产生随电信号变化的光信号, 此种方法为直接调制; 另一种是外调制, 利用电光晶体调制器在光源外部调

制,调制速率高。所有的调制速率可达  $10 \sim 20\text{Gb/s}$ ,远远低于光纤的传输带宽 ( $20\,000\text{Gb/s}$ )。要充分发挥光纤的超大容量的通信传输能力,必须采用光频复用的光纤通信系统,光频复用(FDM)又称光波复用(WDM),就是在光纤中同时采用许多不同波长的光进行传输,光频复用技术可在光纤中开发出  $8 \sim 200$  个光频道,每个频道可容纳  $10 \sim 20\text{Gb/s}$  甚至更高的信息容量,目前 WDM 通信技术已得到广泛应用。

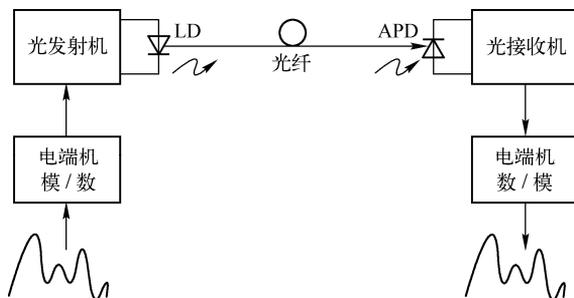


图 1.3 基本光纤通信系统组成框图

## 四、光纤通信的特点和系统分类

光纤通信能够飞速发展,是因为和其他通信手段相比,具有无与伦比的优越性。

### (一) 光纤通信的主要优点

#### 1. 频带宽、通信容量大

一根光纤的带宽在理论上能容纳  $10^7$  路  $4\text{MHz}$  的视频或  $10^{10}$  路的  $4\text{kHz}$  音频,而同轴电缆带宽为  $60\text{MHz}$ ,只能传输  $10^4$  路  $4\text{kHz}$  音频,光纤带宽为同轴电缆的 100 万倍。按话路计算,一对光纤按目前常见的  $2.5\text{Gb/s}$  的通信系统计算,就可达到 28 800 个话路。加上密集波分后话路将非常可观。

#### 2. 损耗低,传输距离远

目前光纤采用的  $\text{SiO}_2$  玻璃介质,纯净度很高,光纤损耗极低。光纤平均损耗为  $0.2 \sim 0.4\text{dB/km}$ ,中继距离达几十至上百千米。

#### 3. 信号串扰小,保密性能好

由于光波具有良好的相干性,随着光器件的不断进步,不同光纤的光信号、同根光纤的不同波长间不会产生干扰,因此,光纤通信比传统的无线通信和其他有线通信具有更好的保密效果。

#### 4. 抗电磁干扰,传输质量佳

由于光纤是非金属的介质材料,且传输的是光信号,因此,它不受电磁干扰,传输质量较好。

#### 5. 尺寸小、质量轻,便于敷设和运输

由于光纤的纤芯直径仅  $125\mu\text{m}$ ,经过表面涂覆后尺寸为  $0.25\text{mm}$ ,制成光缆后,直径一般为十几毫米,要比电缆线径细,质量轻,这样在长途干线或市内线路上,空间利率高,且便于制造多芯光缆。

#### 6. 材料来源丰富,环境适应性强

光纤的制造材料  $\text{SiO}_2$ ,在自然界中含量非常丰富,与电缆制造中大量消耗铜这种有色金属

存在着天壤之别。

由于光纤是由石英玻璃制成的,石英玻璃的熔点在 2000 以上,而一般明火的温度在 1000 左右,因此,光纤耐高温,化学稳定性好,抗腐蚀能力强,不怕潮湿,可在有害气体环境下工作。

## (二) 光纤通信的主要缺点

光纤通信与传统的电缆相比,也存在以下几个主要问题。

(1) 光纤性质脆,需要涂覆加以保护。此外,为了能承受一定的敷设张力,在光纤结构上需要多加考虑。

(2) 在切断和连接光纤时,需要高精度技术和仪表器具。

(3) 光路的分路、耦合不方便。

(4) 光纤不能输送中继器所需要的电能。

(5) 弯曲半径不宜太小。

尽管存在以上问题,但是从目前技术上来说,都是可以克服的,不影响光纤的广泛应用。

## (三) 光纤通信系统的分类

从相对论观点研究,物质无不具有双重性,即波动性与微粒性。物质的波动理论认为光是一种电磁波,因此电磁场理论也适用于光波。从微粒论观点出发,认为光是由一种具有一定能量的光子流组成的。根据光波的双重性,可将光纤通信系统分为经典光纤通信和量子光纤通信两大类。所谓经典光纤通信涉及的方式包括 IM/DD(强度调制/直接检测)方式、相干光纤通信、光孤子通信、全光纤通信和光波分复用通信等。所谓量子光纤通信,是以光子作为信息载体,以光导纤维作为传输介质的通信手段。量子光纤通信的优点在于其通信容量可超过经典光纤通信几个数量级。

从原理上看,构成光纤通信的基本物质要素有光纤、光源和光电检测器。光纤通信系统可根据所传输光的波长、调制信号形式、调制方式和传导模式数量等,分成各种类型。

### 1. 按传输光波长划分

根据传输光的波长,可以将光纤通信系统分为短波长光纤通信系统、长波长光纤通信系统,以及超长波长光纤通信系统。短波长光纤通信系统工作波长为  $0.7 \sim 0.9 \mu\text{m}$ ,中继距离小于或等于 10km;长波长光纤通信系统工作波长为  $1.1 \sim 1.6 \mu\text{m}$ ,中继距离大于 100km,是现在普遍采用的光纤通信系统,其损耗小、中继距离长;超长波长光纤通信系统工作波长大于或等于  $2 \mu\text{m}$ ,中继距离大于或等于 1000km,采用非石英光纤,具有损耗极低、中继距离极长的优点,是光纤通信的发展方向。

目前,短波长光纤通信系统早已被长波长光纤通信系统所代替,长波长光纤通信系统是目目前光纤通信系统应用中的主流。超长波长光纤通信系统具有传输衰减极小等特点,是目前一个重要的研究方向。

### 2. 按调制信号形式划分

根据调制信号的类型,可以将光纤通信系统分为模拟光纤通信系统和数字光纤通信系统。模拟光纤通信系统使用的调制信号为模拟信号,它具有设备简单的特点,一般多用于广电系统传送视频信号,如有线电视的 HFC 网。数字光纤通信系统使用的调制信号为数字信号,它具有传输质量高、通信距离长等特点,几乎适用于各种信号的传输,目前已得到广泛的应用。

### 3. 按传输信号的调制方式划分

根据光源的调制方式,可以将光纤通信系统分为直接调制光纤通信系统和间接调制光纤通

信系统。由于直接调制光纤通信系统具有设备简单的特点，因此在目前的光纤通信中得到了广泛的应用。间接调制光纤通信系统具有调制速率高的特点，所以是一种有发展前途的光纤通信系统，在实际中已得到了部分应用。

#### 4. 按光纤传导模式数量划分

根据光纤的传导模式数量，可以将光纤通信系统分为多模光纤通信系统和单模光纤通信系统。多模光纤通信系统是早期采用的光纤通信系统，目前主要应用于计算机局域网当中。单模光纤通信系统是目前广泛应用的光纤通信系统，它具有传输衰减小、传输带宽大等特点，目前被广泛应用于长途及大容量的通信系统中。

#### 5. 其他划分

其他类型的光纤通信系统参见表 1.1。

表 1.1 其他类型的光纤通信系统

类 别	特 点
相干光通信系统	光接收灵敏度高，光频率选择性好，设备复杂
光波分复用通信系统	一根光纤中传输多个单/双向波长，超大容量，经济效益好
光频分复用通信系统	可大大增加复用光信道，各信道间干扰小，实现技术复杂
光时分复用通信系统	可实现超高速传输，技术先进
全光通信系统	传输过程无光电变换，具有光交换功能，通信质量高
副载波复用光纤通信系统	数模混传，频带宽，成本低，对光源线性度要求高
光孤子通信系统	传输速率高，中继距离长，设计复杂
量子光纤通信系统	量子信息论在光通信中的应用

## 任务二 光纤性能和导光原理认知

### 【任务分析】

光纤是光纤通信的基础。光纤结构如何？它是如何传输光信号的？光纤有哪些特性？目前有哪些主流光纤？本任务学习将从光纤结构和分类入手，展开针对光纤种类和特性、光纤导光原理的学习。

### 【任务目标】

- 光纤的结构和分类；
- 光纤传输原理；
- 光纤主要特性；
- 光纤标准。

### 一、光纤结构和分类

#### （一）光纤的结构

通信用的光纤是指由透明、通光性能良好的材料做成的纤芯和在它周围采用比纤芯的折射

率稍低材料做成的包层被覆，并将射入纤芯的光信号，经包层界面的全反射，使光信号保持在纤芯中传播的媒介，达到传输通信信号的目的。光纤的基本结构如图 1.4 所示。光纤结构的关键就是保证纤芯的折射率比包层的折射率稍大。通信用光纤的外径一般为  $125\mu\text{m}$ ；但纤芯直径存在差异，如多模光纤的为  $50\mu\text{m}$  左右，单模光纤的为  $10\mu\text{m}$  左右。

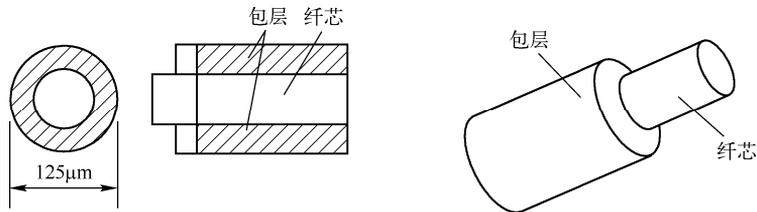


图 1.4 光纤的基本结构

只有纤芯和包层的光纤，就是光纤接续时剥除涂覆层后的裸光纤。它的强度较差，尤其是柔软性差，为达到实际使用的要求，在光纤制造过程中，在裸纤从高温炉拉出后 2s 内立即进行涂覆，经过涂覆后的光纤才能用来制造光缆，满足通信传输的要求，通常所说的光纤就是指这种涂覆光纤。如图 1.5 所示为使用最广泛的两种套塑光纤的结构。如图 1.5 (a) 所示为紧套光纤，预涂覆层、缓冲层、二次涂覆层（尼龙或聚乙烯等塑料套管）等与包层紧密地结合在一起，光纤在套管内不能自由活动，常见的如尾纤；如图 1.5 (b) 所示为松套光纤，就是在光纤涂覆层外面再套上一层塑料套管，光纤可以在套管中自由活动，松套光纤的制造工艺简单，其衰减特性、温度特性与机械性能也比紧套光纤好，因此被大量采用。

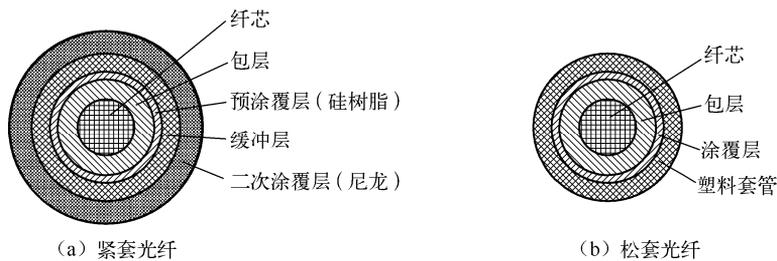


图 1.5 套塑光纤的结构

## (二) 光纤的分类

光纤的分类方法很多，主要是从工作波长、折射率分布、传输模式、套塑方法、原材料性质、制造方法和用途等归纳的，现将各种常用的分类方法列举如下。

### 1. 按工作波长分类

按工作波长可分为紫外光纤、可见光光纤、近红外光纤、红外光纤（波段分别为  $0.85\mu\text{m}$ 、 $1.3\mu\text{m}$ 、 $1.55\mu\text{m}$ 、 $1.625\mu\text{m}$ ）。通信中常用的为红外光纤，具体分类和使用参见表 1.2。

表 1.2 通信中常用光纤分类表

分 类	短波长光纤		长波长光纤	
	0.8~0.9	1.3	1.55	1.625
波段/ $\mu\text{m}$	0.8~0.9	1.3	1.55	1.625
使用范围	短距离，单信道	单信道，长距离 PDH	SDH、长距离 WDM	DWDM
典型光纤	G651	G652B	G655B	G655C、G656

## 2. 按折射率分布分类

按折射率可分为阶跃(突变)(SI)型、渐变(梯度)(GI)型及其他(如三角形、双包层型、凹陷型等)。三种常用光纤结构及传输情况如图 1.6 所示。

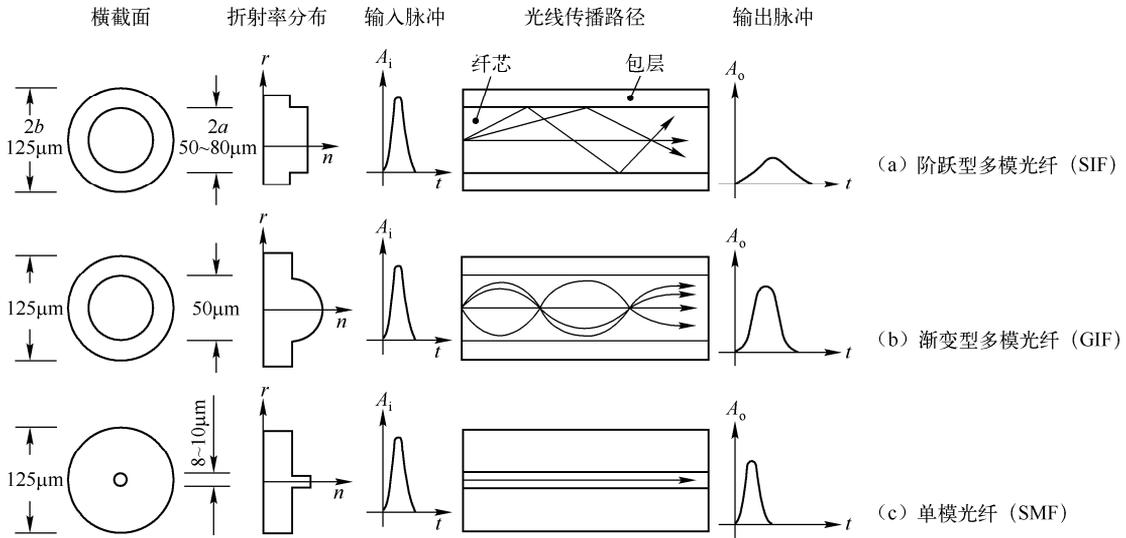


图 1.6 三种常用光纤结构及传输情况

(1) 阶跃型多模光纤 (Step-Index Fiber, SIF) 如图 1.6 (a) 所示, 纤芯折射率为  $n_1$  保持不变, 到包层突然变为  $n_2$ 。这种光纤一般纤芯直径  $2a = 50 \sim 80 \mu\text{m}$ , 光线以折线形状沿纤芯中心轴线方向传播, 特点是信号畸变大。

(2) 渐变型多模光纤 (Graded-Index Fiber, GIF) 如图 1.6 (b) 所示, 在纤芯中心折射率最大为  $n_1$ , 沿径向  $r$  向外逐渐变小, 直到包层变为  $n_2$ 。这种光纤一般纤芯直径  $2a = 50 \mu\text{m}$ , 光线以正弦形状沿纤芯中心轴线方向传播, 特点是信号畸变小。

(3) 单模光纤 (Single-Mode Fiber, SMF) 如图 1.6 (c) 所示, 其折射率分布和阶跃型光纤相似, 纤芯直径  $2a = 8 \sim 10 \mu\text{m}$ , 光线以直线形状沿纤芯中心轴线方向传播。因为这种光纤只能传输一种模式, 所以称为单模光纤, 其信号畸变很小。

## 3. 按传输模式分类

按传输模式可分为单模光纤和多模光纤。由于多模光纤的纤芯直径远大于传输波长 ( $1 \mu\text{m}$  左右), 光纤中会存在几十甚至几百种模式。不同的传播模式具有不同的传播速度与相位, 因此经过长距离的传输后会产生时延, 造成光脉冲展宽, 即模间色散。而单模光纤的几何尺寸与传输波长相比, 光纤只允许一种模式 (基模  $\text{HE}_{11}$ ) 在其中传播, 其余的高次模全部截止。从而避免了模间色散, 具有极宽的带宽, 适用于大容量光纤通信。

## 4. 按套塑方法分类

按套塑方法可分为紧套光纤和松套光纤 (其外边需套上一个较松的套管, 使之可以在中间松动), 如图 1.5 所示。在施工中, 这两种光纤的接续和安装工艺不同。

## 5. 按原材料性质分类

按原材料性质可分为石英玻璃、多成分玻璃、塑料、复合材料 (如塑料包层、液体纤芯等)、红外材料等。

6. 按制造方法分类

按预制棒制造方法可分为有气相轴向沉积法 (VAD) 和化学气相沉积法 (CVD) 等。

7. 按用途分类

为了减少光信号在传输中的衰减程度, 目前有掺铒光纤、零色散补偿光纤、非零色散位移光纤等。

(三) 光纤的结构参数

1. 几何参数

(1) 纤芯直径。纤芯直径是指在光纤的横截面上能够确定纤芯中心的圆的直径。

(2) 包层直径。包层直径是指在光纤的横截面上能够确定包层中心的圆的直径 (常指光纤外径)。

(3) 不圆度。纤芯或包层的不圆度是指断面最大直径与最小直径的差与标称直径的比值。它的不良将对偏振模色散有较大影响。

(4) 同心度。所谓纤芯/包层同心度, 是指纤芯在光纤内所处的中心程度。对于单模光纤, 纤芯/包层同心度误差是纤芯圆心与包层圆心之间的距离。不良的纤芯/包层同心度, 在各类接续设备与连接器内部会引起接续困难和定位不良, 造成损耗增大。

2. 光学参数

(1) 数值孔径。数值孔径表征光纤接收光的能力大小。光纤的数值孔径 (N·A) 对光源耦合效率、光纤损耗、弯曲的敏感性, 以及带宽有着密切的关系。数值孔径大, 耦合容易, 微弯敏感小, 带宽较窄。

(2) 模场直径。模场直径是指单模光纤中传输的基模场强在光纤横截面内分布的范围。对于传输光纤而言, 模场直径 (或有效面积 MFD) 越大越好。

(3) 截止波长。截止波长是指保证单模光纤中光信号单模传输的最小工作波长 ( $\lambda_c$ )。

(四) 带状光纤简介

由于近年来光纤网络的迅速发展, 特别是光纤接入网络的迅速推广, 大芯数光缆被更多地采用, 对于大芯数光缆建设, 采用带状光纤可以极大地提高施工速度。

带状光纤通常由 4、6、8、12、24 芯涂覆光纤, 采取 UV 固化黏结材料黏结成带状, 通过黏结材料把带状光纤组合成阵列排列, 如图 1.7 所示。接续时一般可以同时一次性完成一个带状光纤的接续。

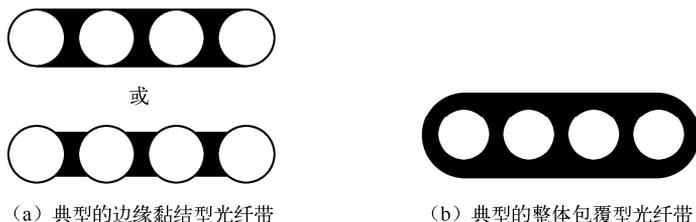


图 1.7 带状光纤截面图

带状光纤的主要性能指标如下。

1. 几何参数

带状光纤的几何参数示意图如图 1.8 所示, 通信行业最大几何参数标准参见表 1.3。

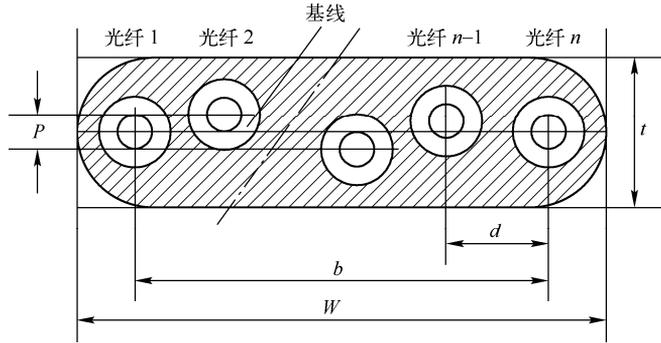


图 1.8 几何参数示意图

表 1.3 通信行业最大几何参数标准

光纤数 $n$	宽度 $W/\mu\text{m}$	厚度 $t/\mu\text{m}$	相邻光纤水平间距 $d/\mu\text{m}$	两侧光纤水平间距 $b/\mu\text{m}$	平整度 $P/\mu\text{m}$
2	700	400	280	280	-
4	1220	400	280	835	35
6	1770	400	280	1385	35
8	2300	400	280	1920	35
10	2850	400	280	2450	35
12	3400	400	280	2980	35

## 2. 标志

12 芯带状光纤全色谱标志规则参见表 1.4。

表 1.4 12 芯带状光纤全色谱标志规则

序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
色谱	蓝	橘	绿	棕	灰	白	红	黑	黄	紫	粉红	天蓝

## 3. 可分离性

光纤带状结构应允许光纤能从带中分离出来，分成若干根光纤的子单元或单根的光纤，并且满足如下要求：

- 不使用特殊工具或器械就能完成分离，撕开时所需的力应不超过 4.4N；
- 光纤分离过程不应使光纤的机械性能造成永久性的损害；
- 对光纤着色层无损害，在任意一段 2.5cm 长度的光纤上应留有足够的色标，以便光纤带中光纤能够相互区别。

## 4. 带状光纤的接续

带状光纤的护层剥离工具为电加热剥除器，使用不同芯数匹配夹具的专用带状熔接机，热熔加强保护管也是特制的。

# 二、光纤传输原理

## (一) 光波速度

光波与电磁波在真空中的传输速度为  $c = 3 \times 10^8 \text{ km/s}$ 。光在均匀介质中直线传播，速度与介

质的折射率成反比，即

$$v = \frac{c}{n} \quad (1.1)$$

式中  $n$ ——介质光折射率；

$c$ ——真空中的光速。

真空的光折射率为 1，其他介质的折射率大于 1，因此传输速度比在真空中小。其中空气的折射率近似为 1，而石英光纤的折射率为 1.458，则光波速度为  $v = 2 \times 10^8 \text{ km/s}$ 。

光波的波长 ( $\lambda$ )、频率 ( $f$ ) 和速度之间的关系为

$$c = f\lambda$$

或

$$v = \frac{f\lambda}{n} \quad (1.2)$$

### (二) 光波的折射与反射

光在同一均匀介质中是直线传播的，但在两种不同的介质的交界处会发生反射和折射现象，如图 1.9 所示。

设  $MM'$  为空气与玻璃的界面， $NN'$  为界面的法线，空气折射率  $n_1 <$  玻璃折射率  $n_2$ 。当入射光到  $MM'$  与  $NN'$  的交接处  $O$  点时，发生一部分光反射回空气，另一部分光折射进入玻璃中的现象。

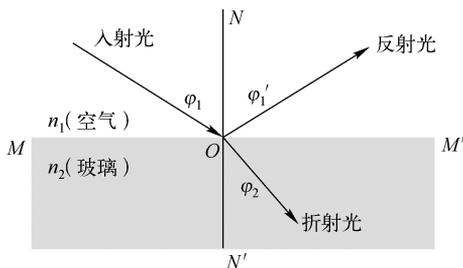


图 1.9 光的反射和折射

根据反射定律， $\phi'_1 = \phi_1$ ，则

$$\frac{\sin\phi_1}{\sin\phi_2} = \frac{n_2}{n_1} \quad (1.3)$$

根据折射定律，假设光在空气和玻璃中的速度分别为  $v_1$  和  $v_2$ ，则根据波动理论可知

$$\frac{\sin\phi_1}{\sin\phi_2} = \frac{v_1}{v_2} \quad (1.4)$$

因此，可推导出

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{n_2}{n_1}$$

### (三) 光波的全反射

根据折射定律，光从折射率大的介质到折射率小的介质时，折射角大于入射角，并随入射角增大而增大。当入射角增大到临界角  $\phi_0$  时，折射角  $\phi_2 = 90^\circ$  (图 1.10)，这时光以  $\phi_1$  角全反射回去，从能量角度看，折射光能量越来越小，反射光能量逐渐增大，直到折射光能量消失。

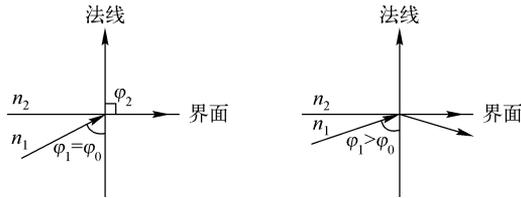


图 1.10 光波的全反射

在这种情况下，

$$\frac{\sin \phi_0}{\sin 90^\circ} = \frac{n_2}{n_1}$$

即

$$\sin \phi_0 = n_2/n_1 \tag{1.5}$$

#### (四) 光纤导光原理

光纤的传输原理，可以用几何光学的反射、折射特性来分析。当光从光密媒介（折射率相对较大）到光疏媒介的交界面会发生全反射现象，即入射角达到一定值时，折线光线将与法线成  $90^\circ$  角，再增大会使折射光线进入原媒介（光纤）传输。

以阶跃型多模光纤的交轴（子午）光线为例，进一步讨论光纤的传输条件。设纤芯和包层折射率分别为  $n_1$  和  $n_2$ ，空气的折射率  $n_0 = 1$ ，纤芯中心轴线与  $z$  轴一致，如图 1.11 所示。

光线在光纤端面以小角度  $\theta$  从空气入射到纤芯（ $n_0 < n_1$ ），折射角为  $\theta_1$ ，折射后的光线在纤芯直线传播，并在纤芯与包层交界面以角度  $\psi_1$  入射到包层（ $n_1 > n_2$ ）。

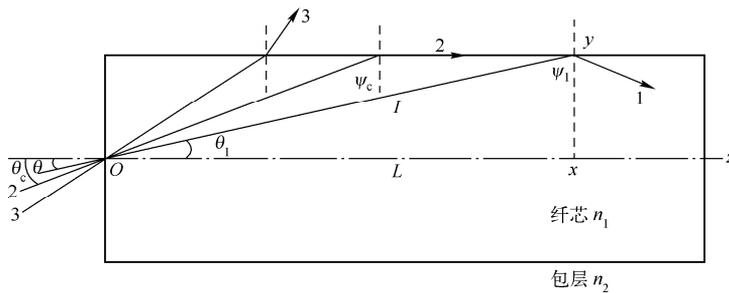


图 1.11 阶跃型多模光纤传输原理示意图

由图 1.11 可知，改变角度  $\theta$ ，不同  $\theta$  相应的光线将在纤芯与包层交界面发生反射或折射。根据光波的全反射情况，存在一个临界角  $\theta_c$ （此时代表在纤芯和包层产生临界角  $\psi_c$  的外部光线入射角）。当  $\theta < \theta_c$  时，相应的光线将在交界面发生全反射而返回纤芯，并以折线的形状向前传播，如光线 1；当  $\theta = \theta_c$  时，相应的光线以  $\psi_c$  入射到交界面，并沿交界面向前传播（折射角为  $90^\circ$ ），如光线 2；当  $\theta > \theta_c$  时，相应的光线将在交界面折射进入包层并逐渐消失，如光线 3。

由此可见，只有在半锥角为  $\theta = \theta_c$  的圆锥内入射的光束才能在光纤中传输，如图 1.12 所示。

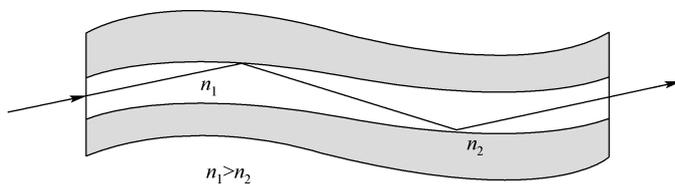


图 1.12 光纤内光波传输

### 三、光纤的主要特性

#### (一) 传输特性

##### 1. 损耗

光纤的损耗又称衰减,很大程度上决定光纤通信的中继距离。损耗用损耗常数  $a(\lambda)$  来表达,表示单位长度的某一波长光功率信号的衰减值,它的表达式为

$$a(\lambda) = \alpha(\lambda) \frac{10 \lg P_i / P_o}{L} (\text{dB/km}) \quad (1.6)$$

式中  $P_i$ ——输入端输入光功率;  
 $P_o$ ——输出端输出光功率;  
 $L$ ——传输长度。

光纤产生损耗的原因很多,其类型主要有固有损耗、外部损耗和应用损耗等,参见表 1.5。

表 1.5 光纤损耗类型及原因分析表

损耗种类	产生原因
固有损耗	(1) 吸收损耗:由 SiO <sub>2</sub> 材料引起的固有吸收和由杂质引起的吸收产生的 (2) 散射损耗:主要由材料微观密度不均匀引起的瑞利散射和由光纤结构缺陷(如气泡)引起的散射产生的
外部损耗	光纤、光缆制造工艺导致微弯辐射损耗
应用损耗	施工安装和使用运行中产生,如张力、弯曲、挤压、潮气等造成的

随着光纤制造技术的提高,损耗已达到或接近理论值,如单模光纤,在 1.3μm 波长上的损耗达到 0.30dB/km;在 1.55μm 波长上的损耗达到 0.18~0.19dB/km。并且通过在制造工艺上进一步采取措施,降低 OH 基含量,将改善光纤的波长特性,特别是在 1385nm 附近的能量吸收特性,为此,研发出了工作波长区大大拓宽的低水峰光纤,有利于多信道复用技术的进一步发展。如图 1.13 所示为光纤的损耗特性谱线。

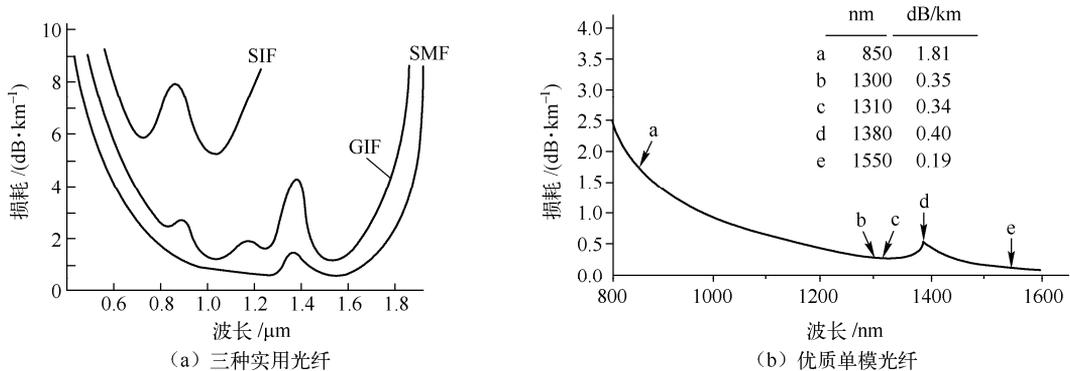


图 1.13 光纤的损耗特性谱线

##### 2. 光纤色散

光纤不仅受损耗的限制,同时光信号的传输还受到色散的制约,即光脉冲沿光纤传输,脉冲宽度将随着距离的增长而展宽,使得传输距离和传输速率受到限制。

光纤的色散可以分为三部分，即模式色散、材料色散与波导色散。

(1) 模式色散是因为光在多模光纤中传输时会存在着许多种传播模式，而每种传播模式具有不同的传播速度与相位，因此虽然在输入端同时输入光脉冲信号，但是到达接收端的时间却不同，于是产生了脉冲展宽现象。它是影响多模光纤带宽的主要因素。

(2) 材料色散是随纤芯内的掺杂浓度不同而变化的，与波长有着十分密切的关系。

(3) 波导色散即结构色散，是由于光纤的几何结构、纤芯尺寸、几何图形、相对折射率差等方面的原因引起的。

单模、多模光纤受色散的影响对比参见表 1.6。

表 1.6 单模、多模光纤受色散的影响对比表

色散 \ 光纤	模式色散	材料色散	结构色散 (波导色散)
多模	主要影响	主要影响	可以忽略
单模	不存在	主要影响	随波长增大

但色散并非是影响通信的完全不利因素，在高速、大容量通信系统中，保持一定的色散是消除非线性效应（四波混频等）的必要条件。

## (二) 机械特性

光纤的机械特性直接关系着它的抗张强度和使用寿命。光纤的抗张强度，很大程度上反映了光纤的制造水平。国内用于工程的光纤一般都应大于  $400\text{kg}/\text{mm}^2$  拉力。光纤强度要经过制造过程筛选实现优选劣汰。

### 1. 影响光纤强度的主要因素

(1) 预制棒的质量，主要是杂质或气泡的影响，尤其是气泡。

(2) 拉丝塔炉的加温质量和环境污染。稳定均匀加温、环境清洁是关键。

(3) 涂覆技术的影响。从拉丝塔炉制成的裸光纤，一般要在  $1\sim 2\text{s}$  内进行涂覆处理，受固化炉的温度、均匀性影响。

(4) 机械损伤。拉丝复绕、套塑工艺过程造成的机械损伤，造成机械性能下降。实验研究发现，环境湿度也会影响光纤的强度，如在环境湿度  $60\%$  以下，湿度减小，强度会增加。

### 2. 光纤断裂分析

存在气泡、杂质和表面有一定损伤的光纤，受到一定张力，在薄弱点就会首先因超过允许应力，将立即断裂，如图 1.14 所示。

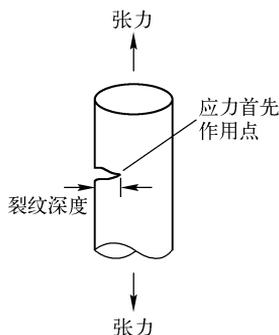


图 1.14 光纤断裂示意图

### 3. 光纤寿命

光纤的使用寿命，受使用环境（如湿度、潮气、静态/动态疲劳）等的影响。光纤表面存在的微裂纹，决定了光纤寿命。长期的应力如果作用于裂纹处，到一定程度光纤即断裂。这一时间就是寿命。

了解光纤的机械特性，就要求施工过程中应注意以下几点：

- 注意张力限制；
- 接续时应注意余长处理和光缆的弯曲半径，减少残余应力；
- 注意安装环境，减免高、低温影响和水、潮气的侵入。

#### (三) 温度特性

光纤因温度变化产生微弯损耗是由于热胀冷缩所造成的。由物理学知道，构成光纤的二氧化硅（SiO<sub>2</sub>）的热膨胀系数很小，在温度降低时几乎不收缩。而光纤在成缆过程中必须经过涂覆和加上一些其他构件，涂覆材料及其他构件的膨胀系数较大，当温度降低时，收缩比较严重，所以当温度变化时，材料的膨胀系数较大，将使光纤产生微弯，尤其表现在低温区。光纤的附加损耗与温度之间的低温特性曲线，如图 1.15 所示。由图 1.15 中看出，随着温度的降低，光纤的附加损耗逐渐增加，当温度降至-55 左右，附加损耗急剧增加。

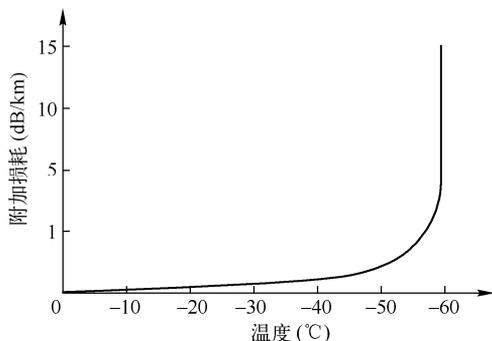


图 1.15 光纤低温特性曲线

## 四、光纤标准

### (一) 光纤标准分类

目前，国际上光纤的标准主要是采用 ITU - T 系列的标准，对单模光纤的标准是 G.650“单模光纤相关参数的定义和试验方法”、G.652“单模光纤和光缆特性”、G.653“色散位移单模光纤和光缆特性”、G.654“截止波长位移型单模光纤和光缆特性”、G.655“非零色散位移单模光纤和光缆特性”及 G.656“用于宽带传输的非零色散位移光纤和光缆特性”；对多模光纤的标准是 G.651“50/125μm 多模渐变折射率光纤和光缆特性”。

国际电工委员会也颁布了系列标准 IEC 60793，我国的光纤标准包括国家标准 GB/T 15912 系列，以及工业和信息化部颁布的通信行业标准 YD/T 系列。

#### 1. 渐变型多模光纤（G.651 光纤）

渐变型多模光纤的工作波长有两种：1310nm 和 1550nm。在这两种工作波长上，光纤均处于多模工作状态。这种光纤在 1310nm 处具有最小的色散值，而在 1550nm 处具有最小的衰减

系数。

国际电工委员会 (IEC) 将渐变型多模光纤按照纤芯/包层尺寸进一步分为 A1a、A1b、A1c 和 A1d 四种。它们的纤芯 ( $\mu\text{m}$ ) / 包层直径 ( $\mu\text{m}$ ) / 数值孔径分别为  $50\mu\text{m}/125\mu\text{m}/0.2$ 、 $62.5\mu\text{m}/125\mu\text{m}/0.275$ 、 $85\mu\text{m}/125\mu\text{m}/0.275$  和  $100\mu\text{m}/140\mu\text{m}/0.316$ 。

目前数据通信局域网 (LAN) 大量用到多模光纤, 接入网的引入光缆和室内软光缆也要用到多模光纤。用得较多的是 A1a ( $50\mu\text{m}/125\mu\text{m}$ ) 和 A1b ( $62.5\mu\text{m}/125\mu\text{m}$ )。

## 2. 标准单模光纤 (G.652 光纤)

标准单模光纤也称为非色散位移光纤, 其零色散波长在  $1310\text{nm}$  处, 在波长为  $1550\text{nm}$  处衰减最小, 但有较大的正色散。工作波长既可选用  $1310\text{nm}$ , 又可选用  $1550\text{nm}$ 。这种光纤是使用最为广泛的光纤之一。

G.652 类光纤进一步分为 A、B、C、D 四个子类。G.652A 光纤主要适用于 ITU - T G.951 规定的 SDH 传输系统和 G.691 规定的带光放大的单通道直到 STM - 16 的 SDH 传输系统, 只能支持  $2.5\text{Gb/s}$  及以下速率的系统。G.652B 光纤主要适用于 ITU - T G.957 规定的 SDH 传输系统和 G.691 规定的带光放大的单通道 SDH 传输系统直到 STM - 64 的 ITU - T G.692 带光放大的波分复用传输系统, 可以支持对 PMD 有参数要求的  $10\text{Gb/s}$  速率的系统。G.652C 光纤的适用范围同 B 类相似, 这类光纤允许 G.951 传输系统使用在  $1360 \sim 1530\text{nm}$  的扩展波段, 增加了可用波长数。G.652D 光纤为无水峰光纤, 其属性与 G.652B 光纤基本相同, 而衰减系数与 G.652C 光纤相同, 可以工作在  $1360 \sim 1530\text{nm}$  全波段。

由于在  $1550\text{nm}$  波段的色散较大, 利用 G.652 光纤进行速率为  $10\text{Gb/s}$  以上的信号长途传输时, 必须引入色散补偿光纤进行色散补偿, 并需引入更多的掺铒光纤放大器来补偿由于色散补偿光纤所产生的损耗。

## 3. 色散位移光纤 (G.653 光纤)

G.653 光纤又称为色散位移光纤 (Dispersion Shifted Fiber, DSF), 是指零色散点在  $1550\text{nm}$  附近的光纤, 它相对于 G.652 光纤, 零色散点发生了移动, 所以叫色散位移光纤。这种光纤非常适合长距离、单信道、高速光纤通信系统, 可以在这种光纤上直接开通  $40\text{Gb/s}$  系统, 而不需要采用任何色散补偿措施。但该光纤在  $1550\text{nm}$  窗口的色散非常小, 比较容易产生各种光学非线性效应。光纤非线性效应导致的四波混频对 DWDM 系统的影响严重, 由于这个原因, G.653 并没有得到广泛推广, 色散位移光纤正在被非零色散位移光纤所取代。

## 4. 截止波长位移型单模光纤 (G.654 光纤)

截止波长是单模光纤中光信号能以单模方式传播的最小波长。截止波长条件可以保证在最短光缆长度上单模传输, 并且可以抑制高次模的产生或可以将产生的高次模噪声功率代价减小到完全可以忽略的地步。

截止波长位移型单模光纤在  $1550\text{nm}$  波长工作窗口具有极小的衰减 ( $0.18\text{dB/km}$ )。与 G.652 光纤比较, 这种光纤的优点是在  $1550\text{nm}$  工作波长处衰减系数极小, 其弯曲性能好。另外, 该光纤的最大特点是工作波长为  $1310\text{nm}$  的系统将处于多模工作状态。这种光纤主要应用在传输距离很远, 且不能插入有源器件的无中继海底光纤通信系统中。

## 5. 非零色散位移单模光纤 (G.655 光纤)

G.655 光纤是将零色散点的位置从  $1550\text{nm}$  附近移开一定波长数, 使零色散点不在  $1550\text{nm}$  附近的 DWDM 工作波长范围内, 这种光纤就是非零色散位移光纤 (NDSF)。

## 6. 非零色散位移单模光纤 (G.656 光纤)

光纤的几个传输波段为 C 波段( 1530 ~ 1565nm )、L 波段( 1565 ~ 1625nm )、E 波段( 1360 ~ 1460nm )、S 波段( 1460 ~ 1530nm )、U 波段( 1625 ~ 1675nm )、O 波段( 1250 ~ 1360nm )。G.656 光纤是为了进一步扩展 DWDM 系统的可用波长范围,在 S 波段( 1460 ~ 1530nm )、C 波段( 1530 ~ 1565nm )和 L 波段( 1565 ~ 1625nm )波段均保持非零色散的一种新型光纤。

### (二) 光纤的演进

随着光纤传输速率的提高,尤其是近年来,随着光纤放大器的应用和波分复用(WDM)技术的发展,人们对光纤有了一些新的要求。在以前的传输网上,进入光纤的光功率不大,光纤呈现出线性传输特性,影响光纤传输特性的因素主要是损耗和色散。然而,随着光纤放大器的应用,超过+18dBm 以上的光信号被耦合进一根光纤,波分复用技术使一根光纤中有了数十条甚至上百条光波道。这时,较高的光能量聚集在很小的截面上,光纤开始呈现出非线性特性,并成为最终限制传输系统性能的关键因素。主要的非线性现象是受激散射和非线性折射(克尔效应)。

在 1550nm 处,常规的 G.652 光纤具有最低损耗特性。再配合使用光纤放大器,可以在 G.652 光纤上开通  $8 \times 2.5\text{Gb/s}$  或  $16 \times 2.5\text{Gb/s}$ ,甚至  $32 \times 2.5\text{Gb/s}$  系统。但由于 G.652 光纤在 1550nm 处的色散值较大,受其影响,当单一波道上的传输速率提高到 10Gb/s 时,传输距离就会大大缩短。因此,高速率的传输系统要求采取色散补偿的方式降低 G.652 光纤在 1550nm 处的色散系数,如在 G.652 光纤线路中加入一段色散补偿模块。但由于采用色散补偿模块,会引入较高的插入损耗,系统必须使用光纤放大器,造成系统建设成本的提高。因此,在骨干传输网上,利用 G.652 光纤开通高速、超高速系统不是今后的发展方向。

将 G.652 光纤的零色散波长从 1310nm 移至 1550nm 处,便成为了 G.653 色散位移光纤。在 G.653 光纤上,使用光纤放大器技术,可将高功率光信号在单波道上传输得更远,是极好的单波道传输媒介,可以毫无困难地开通长距离高速系统。但是对于 DWDM 复用系统,这种光纤不是合适的媒介。G.653 光纤在工作区内的零色散点是导致光纤非线性四波混合效应的源泉。一般来讲,四波混合的效率取决于通路间隔和光纤的色散。通路间隔越窄,光纤色散越小,不同光波间相位匹配就越好,四波混合的效率也就越高,而且一旦四波混合现象产生,就无法用任何均衡技术来消除。但是,若有意识地在生产光纤时使其具有一定的色散,如大于  $0.1\text{ps}/(\text{nm}\cdot\text{km})$ ,则可有效地抑制四波混合现象。因此,一种专门为高速、超大容量波分复用系统设计的新型光纤诞生了,这就是 G.655 非零色散位移光纤。

G.655 光纤的零色散点不在 1550nm 附近,而是向长波长或短波长方向位移,使得 1550nm 附近呈现出一定大小的色散 (ITU-T 规范为  $0.1 \sim 6\text{ps}/(\text{nm}\cdot\text{km})$ )。这样可大大减小四波混频的影响,有利于密集波分复用系统的传输。但同时,也要控制 1550nm 附近的色散值不能太大,以保证速率超过 10Gb/s 的信号可以不受色散限制地传输 300km 以上。根据零色散点出现的位置的不同,G.655 光纤在 1530 ~ 1565nm 的工作区内所呈现的色散值也不同。零色散点在 1530nm 以下时,在工作区内色散值为正值,这种正色散 G.655 光纤适合陆地传输系统使用;零色散点在 1565nm 以上时,在工作区内色散值为负值,这种负色散 G.655 光纤适合海底传输系统使用。

上述三种光纤的主要技术规范见表 1.7。