第1部分

光纤的种类、特性及制备

第1章 光纤的基本概念、结构及分类

1.1 光纤的基本概念

光纤是光导纤维的简写，是一种透明度很高、粗细像蜘蛛丝一样的玻璃丝（由玻璃或塑料制成）——玻璃纤维，如图 1-1 所示。当光线以合适的角度射入玻璃纤维时，光就沿着弯弯曲曲的玻璃纤维前进。由于这种纤维能够用来传输光线，所以称之为光导纤维。



图 1-1 光纤

1966 年，英籍华裔学者高锟（C. K. Kao）和霍克哈姆（C. A. Hockham）发表了关于传输介质新概念的论文，指出“通过原材料的提纯制造出适合于长距离通信使用的低损耗光纤（Optical Fiber）”，利用光纤进行信息传输的可能性和技术途径，奠定了现代光通信——光纤通信的基础。

1.2 光纤的结构

1.2.1 常规光纤的基本结构

光纤的典型结构是一种细长、多层、同轴圆柱形实体复合纤维，自内向外为：纤芯（芯层）→包层→涂覆层（被覆层），如图 1-2 所示。

核心部分为纤芯和包层，二者共同构成介质光波导，形成对光信号的传导和约束，实现光的传输，所以又将二者构成的光纤称为裸光纤。

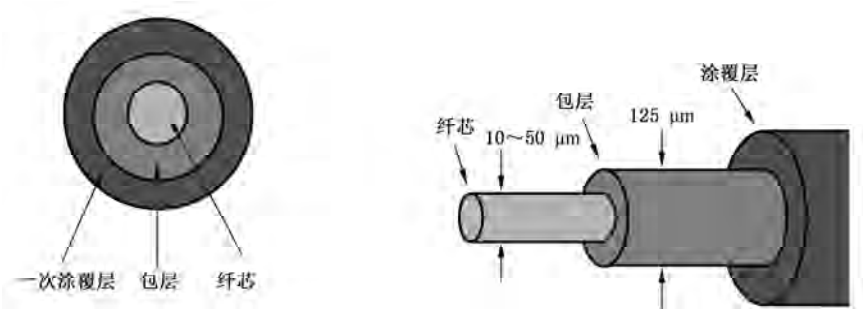


图 1-2　光纤的基本结构

光纤中的涂覆层又称被覆层，是一层高分子涂层，主要对裸光纤提供机械保护。因为裸光纤的主要成分为二氧化硅，它是一种脆性易碎材料，抗弯曲性能差、韧性差；另一方面，在应用时通常将若干根这样的裸光纤集束成一捆，相互间极易产生磨损，导致光纤表面损伤而影响光纤的传输性能。为提高光纤的微弯性能，并防止表面损伤，采取的有效措施就是在裸光纤表面涂一层高分子材料，即外加保护层。

1.2.2　特种光纤的基本结构

特种光纤是为了满足某些特殊应用而设计的光纤，例如偏振保持单模光纤、双芯光纤和光子晶体光纤。偏振保持光纤是指能使输入该光纤的线偏振光独立、稳定地在光纤中传输的一种单模光纤，图 1-3 为椭圆芯偏振保持光纤；双芯光纤的同一包层内含有两根纤芯，每个芯子都是一条光波导，即一根双芯光纤集成了两根单芯光纤，分为同轴双芯光纤和非同轴双芯光纤，如图 1-4 所示；光子晶体光纤（PCF）的包层是由规则周期排列着空气孔的石英光纤阵列构成，它的纤芯则是由一个破坏了包层结构周期性的缺陷构成的，如图 1-5 所示。

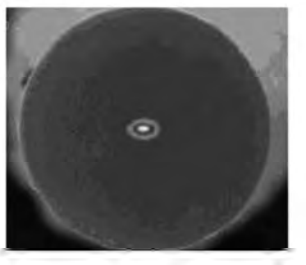
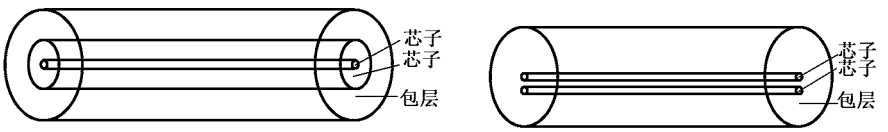


图 1-3　椭圆芯偏振保持光纤



（a）同轴双芯光纤　　（b）非同轴双芯光纤

图 1-4　双芯光纤结构示意图

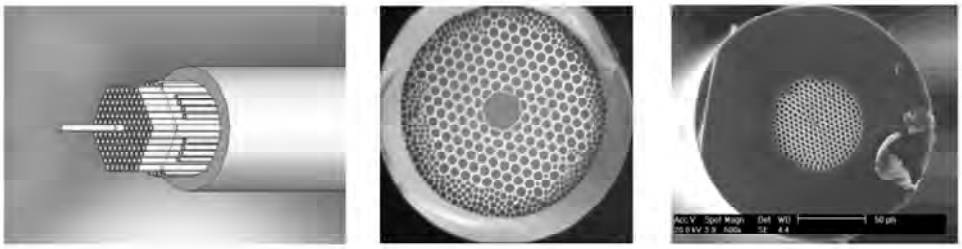


图 1-5　光子晶体光纤结构示意图

1.3　光纤的分类

1.3.1　按传输模式划分

根据光纤中光波传输模式的多少，可分为单模光纤(Single-Mode Fiber，SMF)和多模光纤(Multi-Mode Fiber，MMF)两类。单模光纤只传输一种模式，而多模光纤可传输多种模式。

(1) 单模光纤

SMF 只传输主模，携带单个频率的光将数据从光缆的一端传输到另一端，也就是说光线只沿光纤的内芯进行传输，如图 1-6(a)所示。

SMF 直径较细，约为 10 μm。单模光纤使用的光波长为 1.31 μm 或 1.55 μm。目前在有线电视和光通信中，SMF 光纤是应用最广的一种光纤。

SMF 光纤只能传输一种模式的光，完全避免了模式色散，使得单模光纤的传输频带很宽，因而适用于大容量、长距离的光纤通信。但单模光纤中存在着材料色散和波导色散，研究发现在 1.31 μm 波长处，单模光纤的材料色散和波导色散一为正、一为负，大小也正好相等。这就是说在 1.31 μm 波长处，单模光纤的总色散为零；从光纤的损耗特性来看，1.31 μm 处正好是光纤的一个低损耗窗口。这样，1.31 μm波长区就成了光纤通信的一个很理想的工作窗口，也是现在实用光纤通信系统的主要工作波段。1.31 μm 常规单模光纤的主要参数是由国际电信联盟 ITU-T 在“G652 建议”中确定的，因此这种光纤又被称为 G652 光纤。

SMF 光纤没有模式色散，传输频带较多模光纤更宽，再加上 SMF 的材料色散和结构色散的相加抵消，其合成特性恰好形成零色散的特性，使传输频带更宽。

(2) 多模光纤

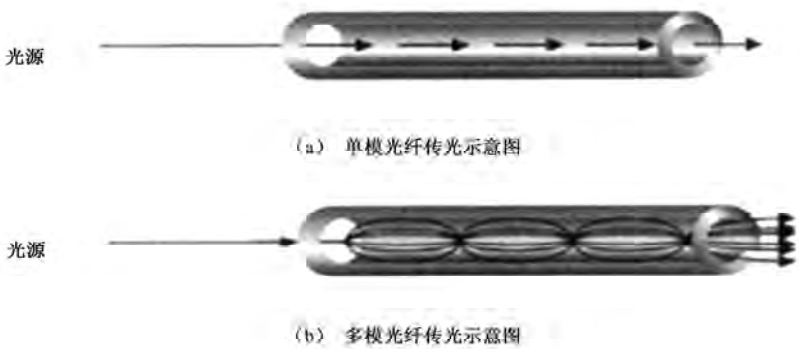
MMF 可以在单根或多根光纤上同时携带几种光波，如图 1-6(b)所示。

MMF 纤芯直径较粗，通常为 50 μm 或 62.5 μm。由于其模间色散较大，限制

了传输数字信号的频率，而且随距离的增加色散会更加严重。例如，600 Mbps/km的光纤在 2 km 时则只有 300 Mbps 的带宽了。因此，多模光纤传输的距离比较近，一般只有几千米。

MMF 光纤在过去用于有线电视和通信系统的短距离传输。不过自从出现 SMF 光纤后，MMF 光纤似乎成为历史。但实际上，由于 MMF 较 SMF 的芯径大，且与 LED 等光源结合容易，在众多 LAN 中更有优势，所以在短距离通信领域中 MMF 重新受到重视。

MMF 按折射率分布进行分类时，可分为渐变型和阶跃型两种。渐变型的折射率以纤芯中心为最高，沿包层渐渐降低。从几何光学角度来看，在纤芯中前进的光束以蛇行状传播。由于光的各个路径所需时间大致相同，所以渐变型传输容量较阶跃型大。



(a) 单模光纤传光示意图

(b) 多模光纤传光示意图

图 1-6 单/双模光纤的信号传输

1.3.2 按纤芯直径划分

按纤芯直径大小，可以分为以下类型：

1) 缓变型多模光纤：50/125 μm。

2) 缓变增强型多模光纤：62.5/125 μm。

3) 突变型单模光纤：8.3/125 μm。

其中，50/62.5/8.3(μm)均是指光纤纤芯直径大小，125(μm)均是指光纤玻璃包层的直径大小。

因为光纤的包层直径均为 125 μm，所以以上 3 种类型的光纤就可标识为：50 μm/125 μm(光纤直径/包层直径)缓变型多模光纤、62.5 μm/125 μm 缓变增强型多模光纤和 8.3 μm/125 μm 突变型单模光纤。在综合布线系统中较为常用的是

62.5 μm/125 μm 缓变增强型多模光纤。

1.3.3 按光纤折射率分布划分

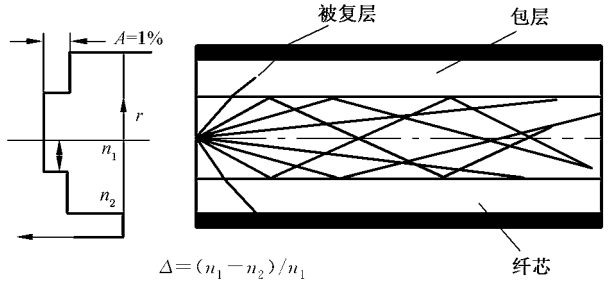
按光纤芯折射率分布划分，光纤又可以分为以下几种类型：

(1) 阶跃型光纤

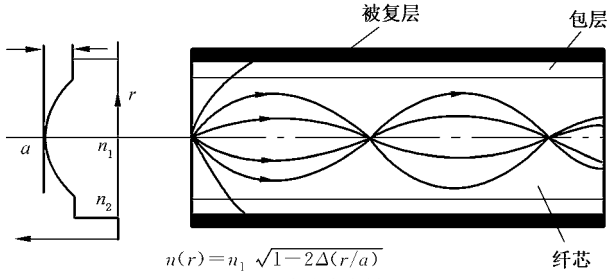
阶跃型光纤(Step Index Fiber，SIF)又称“突变型光纤”。目前，单模光纤多属此类，最早的多模光纤也属此类，如图 1-7(a)所示。这种 SIF 光纤纤芯的折射率与包层的折射率成阶跃型分布。它的特点是芯的折射率是均匀的，在芯和包层之间的分界面上，折射率有一不连续的阶跃性突变。纤芯直径为 50～100 μm，光线以曲折形状传播，缺点是信号畸变大。

(2) 渐变型光纤

渐变型光纤(Graded Index Fiber，GIF)也称为梯度光纤，它有单模和多模两种类型的光纤，其特点是纤芯中心的折射率最大，沿径向往外逐步变小，最后达到包层的折射率，如图 1-7(b)所示。分布曲线近似为抛物线，形成一个连续渐变的梯度或坡度。纤芯直径为 50 μm，光线以正弦形状传播，信号畸变小。



(a) 阶跃型光纤



(b) 自聚焦光纤

图 1-7 阶跃型与渐变型光纤

(3) 单模环形光纤

单模环形光纤(Ring Fiber,RF)折射率分布与突变型光纤相似,纤芯直径为8～12 μm,光线以直线形状沿纤芯中心轴线方向传播。因为光纤只能传一个模式,所以称为单模光纤,其折射率最高,信号畸变小。

(4) 单模 W 形光纤

单模 W 形光纤(W-Fiber,WF)也称为双包层光纤,因其折射率分布像 W 形而得名。它的横截面分为 3 个区域,每个区域内的折射率都是均匀的,中心的折射率最高,中间区域折射率最低,最外面区域的折射率介于两者之间,可以实现10 Gbps容量的 100 km 的超大容量超长距离的信号传送。

(5) 单模三角形光纤

单模三角形光纤(Single-Mode Triangle Type Fiber,SMTTF)纤芯折射率分布曲线为三角形,是一种新型的单模光纤。这种光纤在 1.55 μm 有微量色散,有效面积较大,适合于密集波分复用和孤子传输的长距离系统使用。

(6) 单模椭圆形光纤

单模椭圆形光纤(Single-Mode Elliptical Fiber,SMEF)因其纤芯折射率分布为椭圆形而得名的。这种光纤具有双折射特性,即两个正交偏振模的传输常数不同。强双折射特性能使传输光保持其偏振状态,因而又称为双折射光纤或偏振保持光纤,其优点是传输距离长。

1.3.4 按光纤的组成材料划分

按光纤的组成材料可分为:石英玻璃光纤(主要材料为 SiO_2)、复合光纤(主要材料为 SiO_2、Na_2O 和 CaO 等氧化物)、硅酸盐光纤、氟化物光纤、塑包光纤、全塑光纤、液芯光纤、测光光纤、尾光光纤和工业光纤等。光通信中主要用石英光纤,本书所说的光纤也主要是指石英光纤。

(1) 石英光纤

石英光纤是一种以高折射率的纯石英玻璃材料为芯,以低折射率的有机或无机材料为包层的光学纤维,如图 1-8 所示。由于石英光纤传输波长范围宽(从近紫外到近红外,波长从 0.38～2.0 μm),所以石英光纤适用于紫外到红外各波长信号及能量的传输。另外,石英光纤



图 1-8 石英光纤

具有数值孔径大、光纤芯径大、机械强度高、弯曲性能好和很容易与光源耦合等优点，故在光纤传感、光谱分析、过程控制、激光传输、激光医疗、测量技术、刑侦、信息传输和照明等领域的应用极为广泛，尤其是在工业和医学等领域的激光传输中得到了广泛的应用，这是其他种类的光纤无法比拟的。

(2) 复合光纤

复合光纤(Compound Fiber)是在 SiO_2 原料中再适当混合诸如氧化钠(Na_2O)、氧化硼(B_2O_3)、氧化钾(K_2O)等氧化物的多成分玻璃做成的光纤。其特点是多成分玻璃比石英的软化点低且纤芯与包层的折射率差很大，主要用在医疗业务的光纤内窥镜。

(3) 氟化物光纤

氟化物光纤(Fluoride Fiber)是由氟化物玻璃做成的光纤，如图 1-9 所示。这种光纤原料又简称 ZBLAN(即将氟化锆(ZrF_4)、氟化钡(BaF_2)、氟化镧(LaF_3)、氟化铝(AlF_3)、氟化钠(NaF)等氟化物玻璃原料简化成的缩语)。它主要工作在 2～10 μm波长的光传输业务。

由于 ZBLAN 具有超低损耗光纤的可能性，正在进行着用于长距离通信光纤的可行性开发，如其理论上的最低损耗在 3 pm 波长时可达 10^{-3}～10^{-2} dB/km，而石英光纤的损耗在 1.55 μm 时为 0.15～0.16 dB/km。



图 1-9　氟化物光纤

目前，ZBLAN 光纤由于难以降低散射损耗，只能用在 2.4～2.7 μm 的温敏器和热图像传输，尚未广泛实用。不过，为了利用 ZBLAN 进行长距离传输，最近正在研制 1.3 μm 的掺镨光纤放大器(PDFA)。

(4) 塑包光纤

塑包光纤(Plastic Clad Fiber)是将高纯度的石英玻璃做成纤芯，而将折射率比石英稍低的如硅胶等塑料作为包层的阶跃型光纤，如图 1-10 所示。它与石英光纤相比较，具有纤芯租、数值孔径高的特点。因此，易与发光二极管 LED 光源结合，损耗也较小，非常适用于局域网(LAN)和近距离通信。

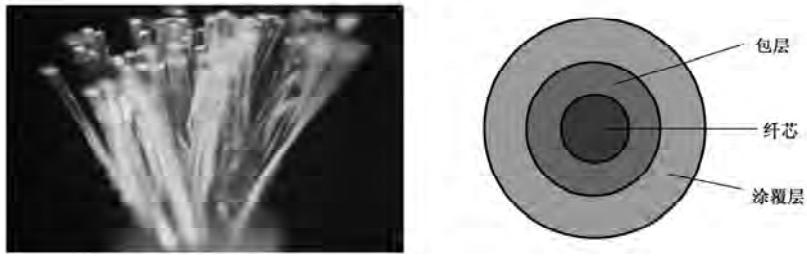


图 1-10　塑包光纤

(5) 全塑光纤

全塑光纤(Plastic Optical Fiber)是将纤芯和包层都用塑料(聚合物)制作成的光纤,如图 1-11 所示。早期产品主要用于装饰和导光照明及近距离光链路的光通信中。原料主要是有机玻璃(PMMA)、聚苯乙烯(PS)和聚碳酸酯(PC)。损耗受到塑料固有的 C-H 结合结构制约,一般每千米可达几十分贝。为了降低损耗正在开发应用氟索系列塑料。由于塑料光纤的纤芯直径为 1 000 μm,比单模石英光纤粗 100 倍,接续简单,而且易于弯曲,便于施工。近年来,加上宽带化的进度,作为渐变型折射率的多模塑料光纤的发展受到了社会的重视。最近,它在汽车内部 LAN 中应用速度较快,未来在家庭 LAN 中也可能得到应用。



图 1-11　全塑光纤

(6) 碳涂层光纤

在石英光纤的表面涂敷碳膜的光纤,被称为碳涂层光纤(Carbon Coated Fiber,CCF)。其机理是利用碳素的致密膜层,使光纤表面与外界隔离,以改善光纤的机械疲劳损耗和氢分子的损耗增加。CCF 是密封涂层光纤(HCF)的一种。

(7) 金属涂层光纤

金属涂层光纤(Metal Coated Fiber)是在光纤的表面涂布 Ni、Cu、Al 等金属层的光纤,如图 1-12 所示。也有再在金属层外被覆塑料的,目的在于提高抗热性和可供通电及焊接。

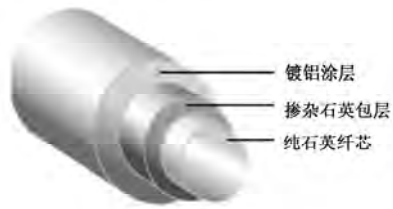


图 1-12　金属涂层光纤

它是抗恶环境性光纤之一，也可作为电子电路的部件用。早期产品是在拉丝过程中涂布熔解的金属制作成的。但此方法因玻璃与金属的膨胀系数差异太大，会增加微小弯曲损耗，实用化率不高。近期，由于在玻璃光纤的表面采用低损耗的非电解镀膜法的成功，使其性能大有改善。

(8) 掺稀土光纤

掺稀土光纤(Rare Earth Doped Fiber)是在光纤的纤芯中，掺杂如铒(Er)、钕(Nd)、镨(Pr)等稀土族元素的光纤，如图 1-13 所示。1985 年英国的南安普顿(Southampton)大学的佩恩(Payne)等人首先发现掺杂稀土元素的光纤有激光振荡和光放大的现象，从此揭开了掺铒等光放大的面纱。现在已经实用的1.55 μm EDFA就是利用掺铒的单模光纤，利用 1.47 μm 的激光进行激励，得到 1.55 μm 光信号放大的。另外，掺杂氟化物的光纤放大器(PDFA)正在开发中。

(9) 发光光纤

发光光纤(Luminescent Fiber)是采用含有荧光的物质制造的光纤，如图 1-14 所示。它是在受到辐射线、紫外线等光波照射时，产生的荧光，可经光纤闭合进行传输的光纤。发光光纤可以用于检测辐射线和紫外线，以及进行波长变换，或用作温度敏感器、化学敏感器。在辐射线的检测中也称作闪光光纤(Scintillation Fiber)。从荧光材料和掺杂的角度上看，目前正在开发塑料发光光纤。



图 1-13　掺稀土光纤

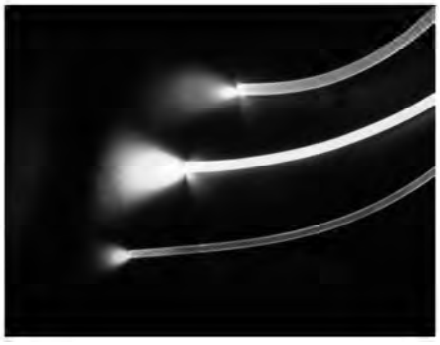


图 1-14　发光光纤

1.3.5　按光纤的套塑划分

按光纤的套塑层可分为“紧套光纤”和“松套光纤”两类。“紧套光纤”中光纤被套管紧紧地箍住，不能在其中松动，它与塑料套层是一个整体结构，如图 1-15 所示。而“松套光纤”可在套管层中松动，套管内填充油膏，以防水渗入。若一根管内含有

多根光纤，则称为松套光纤束。

光纤的分类还非常多，如还可以按一条光纤中所含光芯数量分，目前常见的就有 4 芯、6 芯、8 芯、10 芯、12 芯和 14 芯等，当然也有单芯的。注意这是指芯数，而不是指光传输模式中的单模和多模。无论单模还是多模光纤都可以有单芯和多芯光纤。

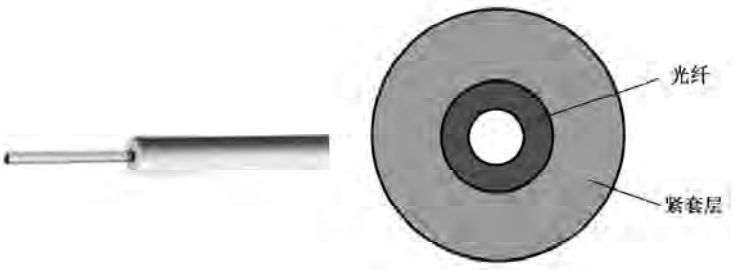


图 1-15　紧套光纤

1.3.6　按光纤的结构划分

按光纤的结构可分为“常规结构光纤”和“微结构光纤”两类。微结构光纤是一种新型光纤，有许多特性。常用的微结构光纤有三种：多孔微结构光纤、布拉格光纤和瓣形微结构光纤。多孔微结构光纤又称为光子晶体光纤，是由其中周期性排列空气孔的单一石英材料构成，按照导光原理又可以分为光子带隙型光子晶体光纤和全内反射式光子晶体光纤。布拉格光纤(Bragg Fiber)是一种一维微结构光纤，其纤芯一般为折射率较低的介质(通常是空气)，包层是径向折射率一维高低周期性分布的介电结构，也可以看作是多层介质镜，光纤的模式由 Bragg 反射束缚在芯层中。瓣形微结构光纤又称为瓣形光纤，纤芯为一种高折射率介质，包层为高低折射率介质相互交错周期排列的瓣形分布。

1.3.7　按国家标准划分

自从 20 世纪 60 年代高锟提出了光纤通信新设想以来，光纤通信获得了飞速发展。光纤是光纤通信的基础与核心传输媒质，光纤技术与呈指数趋势增长的系统容量需求同步发展。按照国际电信联盟 ITU-T 标准，单模光纤从最初的 G.652(型)光纤发展到今天的 G.657(型)光纤，表 1-1 展示了单模光纤的种类与标准发展进程。