

光
纤
通
信
原
理

Guangqian Tongxin Yuanli

光纤通信原理

张德琨 敖发良 邹传云 编

重庆大学出版社

4614

92

73.4614
592
51

光纤通信原理

张德琨 敖发良 邹传云 编

重庆大学出版社

内 容 提 要

本书包括光纤传输线及光纤无源元件；光收信机、发信机；光纤通信系统；相干光通信、光放大器和集成光学等内容。并对当前发展十分迅速的光纤传感器，进行了介绍。同时备有若干典型系统实例和习题，供参考和练习。

本书可作为高等学校电讯专业本科生、专科生的教材或参考书，亦可供有关技术人员参考。

0024/22

光纤通信原理

张德琨 敖发良 邹传云 编
责任编辑 梁 涛

重庆大学出版社出版发行
新华书店经销
重庆大学出版社印刷厂印刷

开本：787×1092 1/16 印张：10 字数：250 千
1992年1月第1版 1992年1月第1次印刷

印数：1—3000

标准书号：ISBN 7-5624-0374-0 定价：2.68 元
TN·8

前 言

光通信技术是一门既古老又年轻的学科，光通信可追溯到古时的烽火台报警，即是最早的光通信设施。但是，真正成为现代通信方面有力的手段，则是本世纪70年代初低损耗光纤出现之后的事情了。在近20年的时间内，光纤通信技术以其无与伦比的优越性，即高速、大容量、传输距离远和抗电磁干扰等性能展现在人们面前，并得到了飞速的发展。预计在本世纪末下世纪初，光纤通信将成为主要的现代化通信手段之一。光纤通信的重要性，不仅体现在对通信技术的直接影响，而且更深远的意义在于它推动了一个新的信息技术领域，使光信息的产生、传输、贮存及处理等方面得以长足发展，其前景是十分光明的。

光纤通信技术涉及的面较宽，不仅与电通信系统的内容有关，而且还与光纤、光电器件和光系统方面有关。本书作为光纤通信技术方面的基础教材，对内容进行了精心选择和安排，在照顾全面的基础上，力求作到深入浅出。并对某些章节作了特殊处理，避开过多繁琐的数学分析，突出物理概念，但又不失其内容的准确性和完整性。本书的第二个特点是，在讲述中，尽量与现有电通信系统的技术进行比较，以突出光通信技术的特点，便于初学者对实质性问题的掌握。其次，在全书的内容安排上，重点是光纤通信系统的原理、分析方法和线路部分，它们分布在三、四、五章中，并备有一定数量的习题供练习时使用。

本书可作为高等学校电讯专业的教材和参考书，亦可供有关技术人员和自学者学习参考。

在编写过程中，曾得到桂林电子工业学院教务处和教材科的积极支持和帮助，特表示感谢。由于编者水平有限，不当之处在所难免，欢迎批评指正。

编者

1990年11月

目 录

第一章 光纤通信概述	(1)
第一节 光通信的历史和分类.....	(1)
一、光通信的历史.....	(1)
二、光通信的分类.....	(2)
第二节 光纤通信趋势及特点.....	(2)
第三节 光纤通信系统的模型和发展现状.....	(3)
一、光纤通信系统的模型.....	(3)
二、光纤通信系统的发展和现状.....	(5)
第二章 光纤传输线和光纤无源元件	(6)
第一节 光纤的结构、分类与制作.....	(6)
一、光纤的结构.....	(6)
二、光纤的分类.....	(6)
三、光纤的制作.....	(7)
第二节 光纤的传输特性.....	(9)
一、光纤的传光原理.....	(9)
二、光纤传光的模式理论.....	(11)
三、光纤的传输特性.....	(18)
第三节 光纤无源元件.....	(30)
一、光纤连接器.....	(30)
二、光纤定向耦合器.....	(31)
三、光纤光路开关.....	(33)
四、光衰减器.....	(34)
五、波分复用器.....	(34)
习题.....	(36)
第三章 光发信机	(37)
第一节 引言.....	(37)
第二节 半导体激光器的工作原理.....	(38)
一、原子的受激辐射和自发辐射.....	(38)
二、光在媒质中的吸收和放大.....	(39)
三、能带结构和载流子的统计分布.....	(40)
四、受激PN结中粒子数反转分布的形成.....	(42)
五、半导体激光器的工作原理及典型结构.....	(43)
第三节 半导体激光器的主要特性.....	(45)
一、半导体激光器的光谱特性.....	(45)
二、半导体激光器的出光特性和伏安特性.....	(50)

三、 半导体激光器的调制特性	(52)
四、 半导体激光器的典型参数	(58)
第四节 半导体发光二极管的原理及特性	(59)
一、 半导体发光二极管的结构和原理	(59)
二、 半导体发光二极管的特性	(60)
第五节 激光发信机电路	(62)
一、 模拟调制电路	(62)
二、 数字调制电路	(65)
习题	(71)
第四章 光收信机	(73)
第一节 引言	(73)
第二节 光电探测器	(73)
一、 PIN光电二极管	(73)
二、 雪崩光电二极管 (APD)	(76)
第三节 光收信机的噪声特性	(78)
一、 光收信机的噪声等效模型	(78)
二、 光电探测器的噪声来源	(79)
三、 放大器的等效噪声	(80)
四、 光收信机输出信噪比的计算	(82)
第四节 光收信机的灵敏度计算	(84)
一、 光、电收信机极限灵敏度的比较	(84)
二、 光收信机的灵敏度计算	(85)
三、 影响灵敏度的其它因素	(94)
第五节 光接收机电路举例	(97)
一、 低阻抗前端的前置放大级	(97)
二、 高阻抗前端的前置放大级	(98)
三、 互阻抗前端的前置放大级	(98)
习题	(100)
附录	(101)
一、 升余弦输出波	(101)
二、 矩形输入波	(102)
三、 高斯输入波	(102)
四、 指数输入波	(102)
五、 波形参数表	(103)
六、 波形参数曲线图	(103)
第五章 光通信系统的总体设计和系统实例	(105)
第一节 光纤通信系统的总体设计	(105)
一、 通信距离受光纤衰减限制的情况	(105)
二、 通信距离受光纤带宽限制的情况	(106)
三、 线路码型的考虑	(109)
四、 收信机灵敏度曲线	(110)

五、	总体设计举例	(111)
第二节	模拟传输系统举例	(112)
一、	FM 制式的模拟图像传输系统	(112)
二、	油港码头光纤通信监视系统	(113)
第三节	数字传输系统举例	(114)
一、	光纤数字通信中继再生机	(114)
二、	140Mb/s 数字彩电传输系统	(116)
第四节	光纤通信网络	(121)
一、	引言	(121)
二、	高速语音干线通信网络	(122)
三、	综合服务宽带局域光纤网络	(122)
四、	星形模拟光纤网络	(125)
	习题	(125)
第六章	光纤通信技术的发展趋势	(127)
第一节	波分复用光纤通信系统	(127)
第二节	相干光通信系统	(127)
一、	相干光通信系统的组成	(128)
二、	光相干接收方式的原理	(128)
三、	相干光通信的优点	(130)
四、	相干光通信的技术问题	(131)
第三节	光放大器	(132)
一、	半导体型光放大器的原理	(132)
二、	光放大器的一般性能	(133)
三、	光放大器在系统中的应用	(133)
第四节	集成光学技术简介	(134)
一、	引言	(134)
二、	光学集成回路	(134)
三、	光电集成回路 (OEIC)	(138)
第七章	光纤传感器	(140)
第一节	光纤传感器原理及分类	(140)
第二节	强度调制光纤传感器	(141)
第三节	相位调制光纤传感器	(143)
第四节	频率调制光纤传感器	(147)
第五节	偏振调制光纤传感器	(148)
	参考文献	(150)

第一章 光纤通信概述

第一节 光通信的历史和分类

一、光通信的历史

光通信的历史，可追溯到数千年以前，古时的“烽火台”报警即是光通信的典型例子。后来欧洲人发明了旗帜通信方式，用旗语来传送信息。当时，在巴黎到土伦的760km路程上，设立了120个中继站，全程传达旗语所需的时间为10~20min，比当时任何交通工具都快得多。一直到莫尔斯电报发明之后（1835年），这种光通信方式才慢慢地退出历史舞台。这一漫长的历史时期，可以称为目视光通信阶段。

第二阶段为光电通信方式。第二次世界大战前后，人们研究了用透镜将光聚束后传输出去，在收端用光电管转换成电信号的光通信方式。这种方法可以得到和无线电报相同的传输速率，使光通信技术向现代化推进了一步。但是，在激光器问世之前，这种方式始终未能取得明显的进展。

光通信技术发展的第三阶段为传输光路的探索阶段。这一阶段是从20世纪60年代初氦氖激光器进入实用阶段开始的。由于这种光源具有良好的特性，使之有可能构成与毫米波波导通信方式相类似的超宽带光通信系统。由于人们看到了它的前景，致使许多从事微波通信的技术人员，转向研究这一新的通信领域。在这一阶段中，研究的重点是解决光的传输路径问题。

传输光路研究的第一方面是：使激光束在大气中传输，用以实现点对点之间的通信。这种方式的光路虽然简单，但在实际测试中发现，大气层中的温度、湿度、尘土、云雾以及雨量等，对这种通信方式影响极大。其原因是，以上因素对激光束造成大的衰减，并使光束的位置发生变动，因而很难连续持久地维持正常通信。这种光通信方式，在活跃了一段时期之后，一般都持否定态度。但是，随着半导体激光器功率的增加，以及其他技术的改进，对于一些特殊应用的场合（例如，军事目的的某些场合，以及将来的深空通信等），大气激光通信方式还是有着广阔的前景。

为了克服大气传光的缺点，人们自然会想到将激光束限制在特定的光路中传输，这样，可以避免外界的影响，从而实现持久可靠的通信。在这种思想指导下，先后提出有空心式光波导管、薄模式光波导、透镜陈列式光波导等等。举例来说，本世纪60年代曾报导过一个透镜阵列式光波导系统，该实验系统放置在直径为90mm的充气管道中，管中配置了焦距 $f=70\text{m}$ 、直径为60mm的透镜，每个透镜的反射损耗为0.5%，相邻透镜之间的距离为140m。试验中，脉冲光束在这样的线路中来回反射，累计经过120km的传输之后，仍能得到良好的脉冲波形，并折算出损耗为0.4dB/km。上述指标是相当优越的，但是实际使用这种管线时，就产生了问题，因为，只有光束与管道的轴线严格对中时才能有效传输，这对于长距离通信是很难做到的。

光通信的第四阶段，是与低损耗光纤的出现直接联系的。1966年英籍华裔学者C.K.Kao

等人指出了制造低损耗光纤的可能性，1970年美国康宁公司率先做出了20dB/km的低损耗光纤。在此之后，光通信技术的进展发生了急剧的变化，光导纤维已成为光通信技术中最优越的传光线路。1972年康宁公司推出了7dB/km损耗的光纤，1973年贝尔实验室又将此项指标降为2.5dB/km，后来，国际上又有1.5dB/km光纤的报导，1979年日本茨城通信研究所做出了接近理论极限值的0.2dB/km的光纤。这样低的传输损耗，是目前广泛使用的同轴电缆无法比拟的。

与此同时，半导体激光器和其他配套技术也得到了迅速发展。从1973年到1985年，传输速率从几Mb/s到400Mb/s的光纤通信设备相继出现，并实用化。目前，先进国家正着力于千兆比特以上宽带系统的开发。我国在1985年已有400Mb/s的光纤通信设备通过鉴定，但在推广和实用化方面，还需作进一步的努力。

二、光通信的分类

从光通信的发展过程可知，按传光媒质可分为两大类：

- ①大气激光通信；
- ②光纤通信。

如前面所述，大气激光通信有一些严重的缺点，因此，光纤通信将在今后的发展中占主导地位。

第二节 光纤通信趋势及特点

本世纪30年代，有人提出这样的观点：“光通信总有一天会取代有线和微波接力通信而起主导作用”。该观点反映出光纤通信技术在未来通信领域中的有效作用，它有着比现代电通信设备明显的优点，在将来的发展中会占据重要的位置。下面从通信技术的发展过程，可以看出光纤通信技术发展的必然趋势。

通信技术的历史，实际上就是逐步提高传输信息量和使用更高载波频率的过程。例如，在有线通信方面，从一对线传送一路话音发展到利用载波传送多路电话。若进一步把载波频率提高到微波频段，并使用同轴电缆或波导作传输线路，在一定的相对带宽范围内，随着载波频率的增加，可传送频分制电话达300路、960路、1800路、2700路，目前最高的可达1300路。使用的载波频率从2GHz、4GHz、6GHz、8GHz等，直到几十千兆赫的毫米波频段。

无线通信方面的微波接力和卫星通信，传输数字信号的速率从2Mb/s、18.15Mb/s、34Mb/s直到400Mb/s或更高。使用的载波频率亦从厘米波扩展到毫米波频段，并继续向毫米波的高端和亚毫米波发展。

由此可见，不管是有线还是无线通信，随着通信容量的增加，必然使用更高的载波频率。对光纤通信而言，载波频率为光频，其数值是很高的。例如1 μ m长的光波，相应的频率为300THz（兆兆赫），那怕使用0.1%的相对带宽，其频带宽度可达300GHz，可容纳现有电通信方式的全部信息量。所以，光纤通信对高速、宽带的干线而言，有着巨大的潜在能力。

从将来用户的需要考虑，那时人们不只是通电话，而是要求话音、文字、数据以及高质量图象等方面的综合服务，即要求信息的宽频带特性。为了传送这些信息，码速可达400Mb/s以上，若使用现有的同轴电缆传输，每隔1.6km就必须设立一个中继站，其技术复杂性和成本都将是高的。对于光纤通信设备而言，400Mb/s的码速，以及十几到几十km无中继传输是比

较容易实现的，现在已有这样的系统投入使用。而且一根光缆中包含有数根光纤，可供多个用户使用，必然会使成本大大下降，其实用意义是非常明显的。因此，不管是大容量、长距离的干线通信，还是宽带特性的用户线路，光纤通信设备都是最好的候选者。

下面，把光纤通信系统与电通信系统作一比较，可以看出，前者的优点是十分明显的。

(1) 由于光波的频率很高，可供利用的频带很宽，尤其适合高速、宽带信息的传输，能在将来的高速通信干线，以及宽带综合服务通信网络中发挥作用。

(2) 由于光纤的损耗很小（现已作到0.2dB/km的量级），可大大增加无中继传输距离，这对长途干线通信十分有利。例如，400Mb/s速率的信号，光纤通信系统已达到了100km以上的无中继传输距离，在采用先进的相干光通信技术之后，已将此距离提高到270km。然而，同样速率的同轴电缆通信系统，无中继距离仅为1.6km左右。

(3) 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，在中继站和接收端采取幅度均衡措施比电信系统简单，甚至可以不用。

(4) 光纤内传播的光能几乎不会向外辐射，因此很难被窃听，也不会造成同一光缆中各光纤之间的串扰。而电信系统中的电缆，则不具备上述特性。

(5) 光纤传输线不受电磁干扰。这对于电气铁道和电力线附近的通信极为有利。光纤系统没有发生电火花的危险，因此，在一些要求防爆的场合使用是十分安全的。

(6) 制作玻璃光纤的原料是石英石，来源十分丰富，比起制作电缆的铜、铅等材料，可以说是取之不竭。另外，光纤比电缆的尺寸小且重量轻，因此便于敷设。

表1-1 光纤通信系统的特点

系 统 特 点	效 果
低 传 输 损 耗	中继距离长，可减小线路设备量和成本
大 带 宽 能 力	信息容量大，可用于宽带、高速通信
光缆尺寸小、重量轻	便于敷设和空间的使用
不 受 电 磁 干 扰	可用于强电磁干扰环境下的通信
没有感应和辐射	不产生串扰，不被窃听

第三节 光纤通信系统的模型和发展现状

一、光纤通信系统的模型

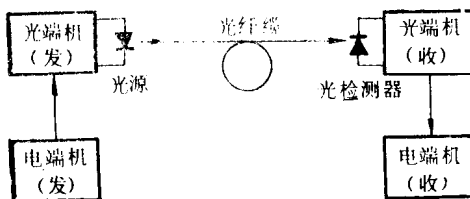


图1-1 光纤通信系统

目前，实用的光纤通信系统几乎都由图1-1所示的框图组成。图中仅示出了一个方向的信道，对于双向而言，只要增加一条同样的反向信道即可。

图示的光纤通信系统由三部分组成：光发信机；传输光缆；光收信机。其中电端机（收、发部分）为常规的电子通信设备。

光发信机实质上是一个电光调制器，它用电端机（发）送来的信号对光源进行调制，光源一般为半导体激光器和发光二极管。调制的方式，原则上可使用振幅、频率和相位调制，但由于目前实用的激光器等光源的频谱不纯，频率也不稳定，使调频或调相方式难以实现。因此，现有实用系统都是采取控制光功率大小的调幅方法，通常又被称为直接强度调制。经调制后的光功率信号耦合入光纤，然后向对端传输。对端光收信机的光电检测器（一般为半导体PIN管和雪崩管）把光信号转换成电信号，再经放大、整形处理后送至电端机（收）。

以上系统框图对模拟或数字信号都适用。对模拟信号而言，由电端机（发）送来的话音或图像信号，经光端机的电平转换电路（调制器），对光源的强度实施调制。要使信号不失真，就要求光源有良好的线性幅度特性。但是常用的光源，尤其是半导体激光器的非线性比较严重，所以模拟光通信系统常用在对非线性失真要求不太严格的地方。

对于数字光纤通信系统而言，由于信号为脉冲形状，因此光源的非线性对系统性能影响不大。如图1-1所示的框图可具体化为图1-2的组成：

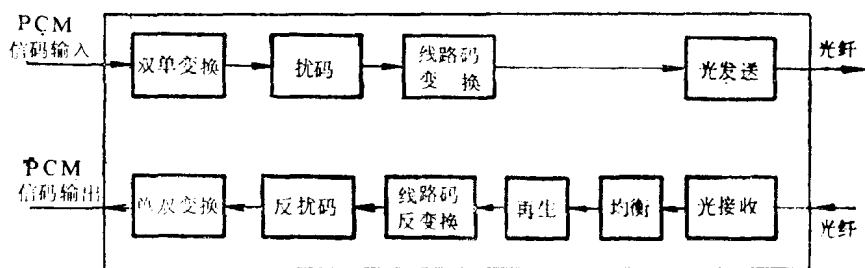


图1-2 数字式光端机框图

(1) 双单变换和单双变换单元 双单变换是把来自电端机的双极性码信号转换成单极性码，以便实施对光功率的调制。单双变换则实现相反的过程。

(2) 扰码和反扰码单元 扰码是用以减少数字信号中长连“0”或“1”的情况，以便于时钟信号的提取。反扰码则是还原的过程。

(3) 线路码型变换和反变换单元 其作用是为了适应光纤传输系统的特点，以及监测误码率的需要，把原来码型变换为线路码型。反变换则为相反的过程。

(4) 光发送单元 光发送部分实际上是一个光脉冲调制器，经过它把数字信号的电脉冲调制成光脉冲，并把光脉冲耦合入光纤。

(5) 光接收单元 光接收部分由光电检测器和低噪声放大器组成。来自光纤的光脉冲信号照射在检测器上，产生出电脉冲信号，经放大后输出。

(6) 均衡单元 光纤的传输可能使光脉冲波形产生畸变和码间干扰，采用均衡器可以克服上述影响，以便实施判决和定时信号的提取。

(7) 再生单元 对经过判决之后的数字信号进行再生，其原理和过程与电系统中的一样。

由此可知，数字式光通信系统与电缆通信系统本质上是一样的，只是用光脉冲代替了电脉冲，所以它也具有电信数字系统的一切优点。但由于光能量只能是正值，因而只能传输单极性码，而电缆中传输的PCM信号常采用双极性码。所以，在光纤数字通信系统中，对传输信号的处理有所不同。由于光纤通信系统中的噪声来源及其性能的独特性，使光纤通信系统的信噪比分析、误码率的计算与常规的电信系统有所不同。

光纤通信系统可归结为电—光—电的简单模型。即语音和图像信号等必须先变成电信号，然后转换成光信号在光纤内传输，对端又将光信号变成电信号，此电信号经处理之后恢复成语音或其他信号形式。整个过程中，光的部分只起传输作用，对于信号的生成和处理，仍由电系统来完成。这样的系统是否会降低光通信的价值和潜在能力呢？是的，混合系统的能力是有限的。但是，也不能低估它的作用，混合系统已经显示出了许多优点。随着技术的发展，将会出现去掉了“电”环节的“全光通信设备”，其通信速率将会有极大的提高。不过，在相当长一段时间内，电—光—电的模式不仅存在，而且还会得到很大地发展。

二、光纤通信系统的发展和现状

70年代出现低损耗光纤，至今已有近20年的时间，按电—光—电模式的光纤通信系统已经历了两个阶段，现在正处于第三阶段之中。

第一代的技术已显得陈旧，但是从经济性、难度低以及容易处理等方面考虑，仍有广阔市场，主要用于局部网络和用户线路中，其技术性能主要表现为：使用多模光纤以及光波长为 $0.85\mu\text{m}$ 的光源（多模激光器和发光二极管）；无中继距离为10km左右；传输码速小于100Mb/s。以上指标是1980年以前的水平。

随着单模光纤的研制成功、材料的改进和长波长激光器的使用等，使光纤的损耗进一步减小，并改善了传输过程中色散的影响，增加了系统的宽带特性，使光纤通信技术在高速宽带的干线通信中得到推广。以上是第二代技术的特点。在 $1.3\mu\text{m}$ 的波长上传输速率可达500Mb/s的量级，无中继距离增加到50km以上。这些工作是1985年以前完成的。

第三代技术将波长移到损耗最小的 $1.55\mu\text{m}$ 处，光源使用频谱更纯的分布反馈型激光器，改进调制技术等，使传输速率达到500Mb/s至2Gb/s的范围，无中继距离增至80km到100km。

第四代可能是利用外差接收方式的相干光通信技术，这种体制可使无中继通信距离进一步提高（实验室水平已达到270km左右）。另外就是在激光器光谱更窄更稳定的基础上，实现更多波长上的波分复用技术，使通信容量得到扩大。

第二章 光纤传输线和光纤无源元件

自1970年首次出现20dB/km损耗的光纤以来，光纤传输线的理论分析和实际制作工艺方面，都取得了很大的进展。就其损耗而言，已降到0.2dB/km，单模光纤的带宽长度积已接近100GHz·km，从而使高速信息（1Gb/s以上）的远距离传输（无中继距离100km以上）成为可能。

本章主要讲述光纤的结构与分类、光纤的传光原理及特性、常用的光纤元件等。

第一节 光纤的结构、分类与制作

一、光纤的结构

光纤的结构十分简单，如图2-1所示。图中的中心部分是玻璃制作的纤芯，其折射率为 n_1 。芯子外面覆盖了一层折射率为 n_2 的玻璃包层，而且 $n_2 < n_1$ ，并有以下大致的数量关系，即折射率差 $\Delta = (n_1 - n_2) / n_1 \approx 1\%$ 左右。在包层外面还要套上一层塑料，以提高光纤的机械强度并起保护作用。

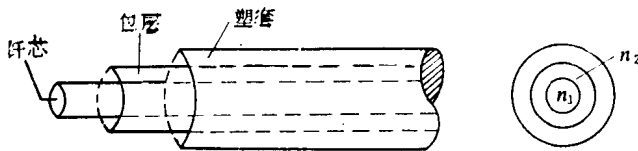


图2-1 光纤的结构

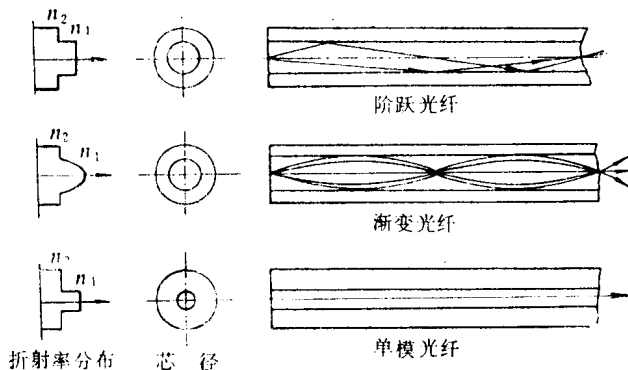


图2-2 光纤的折射率分布及传光路径

若纤芯的折射率是渐变的，中心最大为 n_1 ，逐渐下降到包层处的 n_2 ，这种光纤称为渐变折射率光纤。以上光纤折射率的分布，分别表示在图2-2中。

二、光纤的分类

按制作光纤的材料不同，可分为：

- (1) 石英光纤；
- (2) 多组分玻璃光纤；

机械强度并起保护作用。

在正常情况下，大部分光能沿纤芯传输，在包层中也有沿径向衰减的光场存在。因此，光纤的纤芯和包层材料都必须都是低损耗的。

同金属波导中的情况一样，当导波结构（光纤中为纤芯）的横向尺寸可以与波长相比拟时，仅有单一模式的光能通过，但是，对于较大的纤芯直径，则是工作于多模的情况。对于 $1\mu\text{m}$ 左右的光波长而言，单模光纤的直径为 $1-10\mu\text{m}$ ，而多模光纤的芯径已标准化为 $50-60\mu\text{m}$ 。为了实用的方便，光纤的外径都做成 $125\mu\text{m}$ 。另外，若纤芯和包层的折射率都是常数时，这种光纤称为阶跃折射率光纤。

(3) 全塑料光纤。

其中用石英玻璃制成的光纤损耗最小，它最适合于长距离、大容量的光纤通信使用。塑料光纤的损耗很大，但机械性能好，且价格便宜，可用于某些特殊短距离的场合。

按光纤的结构不同，可分为：

(1) 阶跃光纤 纤芯和包层的折射率呈突变分布的形式。这种光纤的带宽较窄，适于小容量短距离通信。

(2) 渐变光纤 纤芯折射率分布近似呈抛物线型，此类光纤频带较宽，适用于中容量、中距离通信使用。

按传输光场的模式不同，可分为：

(1) 多模光纤 纤芯内传输多个模式的光波。大尺寸的阶跃光纤和渐变光纤均属这种类型。

(2) 单模光纤 纤芯中仅传输一个最低模式的光波，它的结构可以是突变型或渐变型，但尺寸很小。此类光纤带宽极宽，适用于大容量长距离通信系统。

以上光纤的分类，以及它们的主要性能特点，归纳于表2-1中。

表2-1

光纤类型	纤芯直径 (μm)	材 料	传输损耗(dB/km)			$B \times L$ (GHz·km)
			0.85 μm	1.3 μm	1.55 μm	
单模光纤	1~10	纤芯：以二氧化硅为主的玻璃 包层：以二氧化硅为主的玻璃	2	0.38	0.2	50~100
多模阶跃型光纤	50~60(200)	纤芯：以二氧化硅为主的玻璃 包层：以二氧化硅为主的玻璃	2.5	0.5	0.2	0.005~0.02
		纤芯：以二氧化硅为主的玻璃 包层：塑料	3	高	高	
		纤芯：多组分玻璃 包层：多组分玻璃	3.5	高	高	
多模渐变型光纤	50~60	纤芯：以二氧化硅为主的玻璃 包层：二氧化硅为主的玻璃	2.5	0.5	0.2	1
		纤芯：多组分玻璃 包层：多组分玻璃	3.5	高	高	0.4

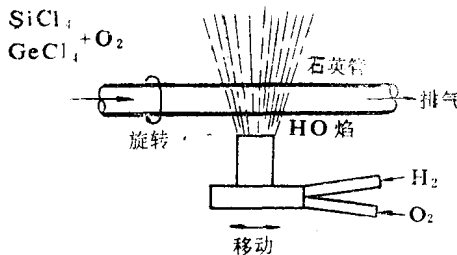


图2-3 MCVD法熔炼工艺示意图

三、光纤的制作

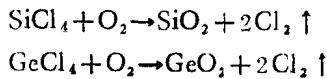
光纤的类型不同，制作的工艺也有所不同。这里仅以改良的化学气相沉积法(MCVD法)来说明光纤的制造过程。

光纤的制作过程一般可分为三个主要步骤：(1)熔炼；(2)拉丝；(3)套塑。

(1) 熔炼 熔炼过程即是把纯度极高的

化学原料，经高温化学反应后，合成低损耗的石英棒料。MCVD法熔炼工艺的示意图如图2-3所示。

为了保持化学反应不受污染，把反应过程置于一根石英管坯内进行。在管的一端通入气相原料四氯化硅（ SiCl_4 ）、四氯化锗（ GeCl_4 ）和纯氧，从管的另一端排出废气，管外用氢氧焰加热至1400—1500℃，此时，石英管内的化学原料将产生如下的反应



反应生成物中， SiO_2 就是石英， GeO_2 是用来改变石英折射率的掺杂剂。合成后的 SiO_2 和 GeO_2 以粉末状沉积在石英管壁上，遇到管壁上的高温之后，立即融化成一层很薄的透明含锗石英玻璃。

火焰来回移动，管子均匀旋转，优质的含锗石英玻璃一层层均匀地沉积在管壁内。为了制造渐变型光纤，逐渐改变 GeCl_4 的流量，可以控制沉积玻璃层的折射率。

当管内沉积的芯玻璃层足够厚时，提高火焰的温度，随即石英管被软化，由于表面张力的缘故，石英管自动收缩并使管子的中心孔填满，即熔炼成控制光纤时使用的坯棒。

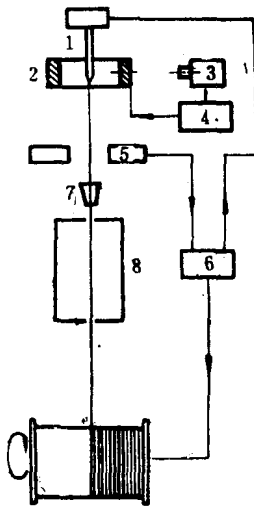


图2-4 拉丝装置示意图

- 1—光纤坯棒；
- 2—高温炉；
- 3—测温仪；
- 4—炉温控制；
- 5—非接触式测径仪；
- 6—调速设备；
- 7—光纤涂敷器；
- 8—固化炉；
- 9—拉丝轮

(2) 拉丝 拉丝的过程是把粗的坯棒拉制成细长的光纤，其示意装置如图2-4所示。

将坯棒十分缓慢地送入高温炉中，炉内温度均为2000℃，光纤坯棒被软化后，即可拉成细的光纤。在拉制过程中，为了保护光纤的表面不被外界污染，必须在光纤形成时，立刻涂敷一层保护玻璃表面的涂料。光纤继续经过固化炉，使涂层固化。最后卷绕在拉丝轮的套筒上。为了得到几何精度非常高的光纤，拉丝设备装有丝径测控反馈装置、炉温和拉丝速度的自动控制系统。

(3) 套塑 为了进一步保护光纤，提高光纤的机械强度，还需要把经一次涂敷的光纤套上塑料套管。

经过上述步骤，单根光纤就算制造完毕。但是，这样的光纤还不能在工程中使用，必须加工成光缆后，才具有实际应用的价值。

光缆的形式很多，外形上有圆的也有扁的，芯数也有多有少。较为常见的有常规式和骨架式结构方式，如图2-5所示。光缆中除具有多根光纤外，还备有铜质的信号线和钢质的加强

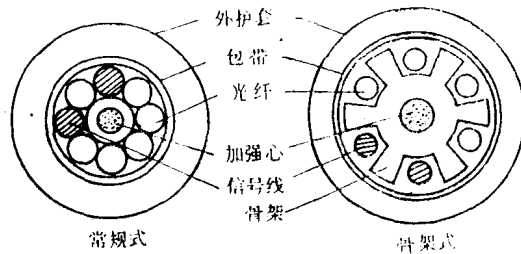


图2-5 光缆结构

芯，用以传输必要的电信号，以及提高在施工中的抗拉能力。

第二节 光纤的传输特性

光纤作为光纤通信系统的传输线路，其性能的好坏直接影响通信的距离和速率等主要指标。光纤传输特性的基本参数有：衰减，带宽和数值孔径。

光亦是电磁波，不过频率极高罢了，并且习惯用波长来表示其特征，而电信系统中常用的则是频率。要分析光在光纤内的传输性质，标准的理论方法，是从麦克斯韦方程出发，对导出的波动方程求解。这种方法能精确地揭示出光纤内各电磁场分量的传输特性，以及各种导波场模式的分布特点。但是，分析过程比较复杂，物理概念也不大明显。所以，我们采用了光线理论的分析方法，这种方法的物理描述非常直观，容易使人理解，但分析的内容有一定局限性。不过，理论上已经证明，当光纤的模向尺寸远大于使用的光波长时，而且纤芯内折射率变化缓慢的情况下，用光线理论来处理光波传播的问题还是允许的。因此多模光纤的结构和尺寸，就符合上述条件。

下面主要从光线理论出发，讨论光纤的传输特性。但是，也列出了波动方程方法得到的主要结论，作为光线理论分析的补充。

一、光纤的传光原理

如图2-6所示的阶跃型光纤中，纤芯的半径为 a ，折射率为 n_1 ，包层的折射率为 n_2 ，且 $n_1 > n_2$ 。当光纤的输入端被光源照射时，通过光纤的光线可分为两类：

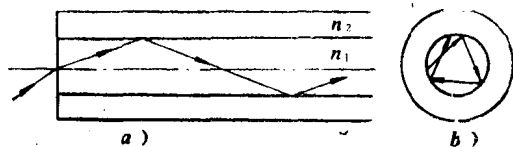


图2-6 光线的传播路径
a) 子午光线 b) 斜射光线

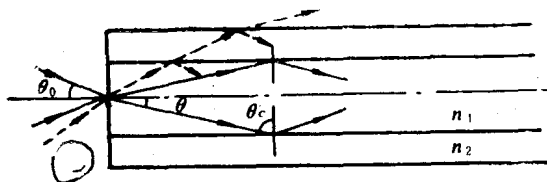


图2-7 子午光线传光原理图

(1) 子午光线 这种光线的路径特点是，只在一个包含光纤轴线的平面内不断反射前进，如图(a)所示。

(2) 另一类光线为斜射光线（或称非子午线光线），它向前反射传输的过程不与轴线相交，而是绕轴线反射前进。若从光纤的端面观察时，如图(b)所示，它是一组按一定方向旋转的折线轨迹。下面分析造成光线反射前进的条件。

1. 子午光线的传播分析

如图2-7所示的阶跃型光纤中，在包含轴线的平面内，光线以入射角 θ_0 照射到光纤端面上，图中只画出了入射到端面中心点的光线作为代表。在光纤内部，光线以角度 θ 的方向折射前进，根据折射定律有以下的关系

$$\frac{\sin \theta_0}{\sin \theta} = \frac{n_1}{n_0} = n_1 \quad (2-1)$$

式中假设光纤外的折射率 $n_0 = 1$ 。

进入纤芯的光线，传到纤芯与包层交界处时会发生反射。从传光的角度考虑，希望在界

面处发生全反射，以使光能被约束在纤芯之中。根据反射定律，发生全反射的临界角 θ_c 的条件为

$$\sin\theta_c = \frac{n_2}{n_1} \quad (2-2)$$

由此可推算出满足全反射条件时，光线入射角度 θ_0 相应的 $\sin\theta_0$ 值为

$$\begin{aligned} \sin\theta_0 &= n_1 \sin(90^\circ - \theta_c) = n_1 \sqrt{1 - \sin^2\theta_c} \\ &= n_1 \sqrt{1 - \frac{n_2^2}{n_1^2}} = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \end{aligned}$$

一般 θ_0 的数值较小，所以有以下的近似关系

$$\theta_0 \approx (n_1^2 - n_2^2)^{1/2} \quad (2-3)$$

式(2-3)的数值表明，在一个平面内，能够接受子午光线的最大角度范围是 $\pm\theta_0$ ，并以数值孔径的参量加以定义，即光纤的数值孔径

$$NA = \theta_0 \approx \sin\theta_0 = (n_1^2 - n_2^2)^{1/2}$$

又因 n_1 与 n_2 的差值甚小，故又有

$$NA \approx n_1 \sqrt{2\Delta} \quad (2-4)$$

式中 $\Delta = (n_1 - n_2) / n_1$ ，称为相对折射率差。

数值孔径 NA 是表示光纤接纳光源光线能力的参量，在一定条件下， NA 值大，说明由光源传入光纤的光功率多，反之则小。所以将数值孔径作为描述光纤性能的基本参量之一。

以上分析说明，子午光线要能在纤芯中有效传输，必须满足入射角 θ_0 小于 NA 值的条件。满足条件的子午光线，在纤心中依照一定的路径，不断全反射前进。入射角 θ_0 大于 NA 值的光线（如图中虚线所示），会不断折射入包层之中，并透射出光纤被损耗掉，因而不能在纤芯内传输。

满足传输条件的不同入射角的子午光线，在纤芯内传播时有不同路径，使它们载送光能在轴向传输的速度就有所差异，这些速度不等的光线就构成了传输光能的不同模式，所有这些传输模式，决定了光在光纤中的传输性质，并把存在有多种模式传输光能的光纤称为多模光纤。

2. 斜射光线的简单分析

由于在光纤内形成斜射光线比较困难，而且分析也相当麻烦，这里只对其传输过程稍加说明。斜向射入纤芯的光线，在满足全反射的条件下（角度的定义与子午光线有所不同），亦会在纤芯与包层的界面处重复地反射前进。不过，光线的路径不是在子午线平面内，而是绕轴线旋转前进。可以想象，这种光线在轴向前进的速度是极其缓慢的。因此，斜射光线的存在，相当于在光纤中又增加了一些传光速度缓慢的传输模式。

3. 渐变光纤中光线的传播分析

渐变光纤中，纤芯的折射率 $n(r)$ 随半径方向呈抛物线规律变化，即：

$$n(r) = n(0) \left[1 - 2 \left(\frac{r}{a} \right)^2 \Delta \right]^{1/2} \quad (2-5)$$