

DIANLI

电力行业继续教育培训教材

光纤通信技术 及其在电力系统中的应用

王延恒 贺家礼 徐刚 编著

GUANGQIANTONGXIN JISHU
JIQI ZAI DIANLIXITONGZHONGDE YINGYONG



中国电力出版社

www.cepp.com.cn

电力行业继续教育培训教材

光纤通信技术 及其在电力系统中的应用

王延恒 贺家礼 徐刚 编著

GUANGQIANTONGXIN JISHU
JIQI ZAI DIANLIXITONGZHONGDE YINGYONG



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

内 容 提 要

本书简单地介绍了光纤通信系统的各个组成部分及其主要技术指标,重点讨论了光纤数据传输中的同步及差错控制问题、各种光纤传输网络,以及这些技术在电力系统中的具体应用。

本书共九章。第一章为概述;第二章扼要地介绍了光纤的构成、传光原理、特性,以及它的可利用的传光波段范围;第三章介绍了光发射机的组成,及其激光器、发光二极管的构成、工作原理、特性,以及光发射机的驱动和控制电路;第四章介绍了光接收机中的光电二极管和雪崩二极管的构成、工作原理、特性,以及它们的各项技术指标,同时也介绍了光接收机中的前置放大电路;第五章介绍了光纤通信系统,对光纤通信系统中的新技术——波分复用、密集波分复用、粗波分复用等技术的工作原理、应用价值和前景等,也作了简单的介绍;第六章对光纤通信系统中的无源光器件作了简单的介绍。

第七章到第九章为本书的重点。第七章介绍了光纤数据传输中的同步问题,对于电力系统中电网继电保护信息传输的相关问题,作了较多的讨论;第八章讨论了各种光纤传输网络,对其中相关网络在电力通信系统中的应用作了较详细的讨论。第九章讨论了光纤数据传输中的差错控制问题,以及特高压电网、高压电网中的架空地线复合光缆和全介质自承式光缆在电网中的架设问题等。

本书的编写具有基础部分通俗化、专业部分实用化的特点。专业部分相关内容的素材均来自电力系统中光纤通信第一线,极具实用和参考价值。

本书可供在电力系统中从事光纤通信工作的技术人员学习。可作为培训教材,使学员有针对性地掌握相关内容。本书也可供铁路系统、电信系统和矿业系统等从事光纤通信的广大技术人员学习、参考。

图书在版编目(CIP)数据

光纤通信技术及其在电力系统中的应用/王延恒,贺家礼,徐刚编著. —北京:中国电力出版社,2005

电力行业继续教育培训教材

ISBN 7-5083-3614-3

I. 光... II. ①王... ②贺... ③徐... III. ①光纤通信-技术培训-教材②光纤通信-应用-电力系统-技术培训-教材 IV. ①TN929.11②TM73

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 108407 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 100044 <http://www.cepp.com.cn>)

北京市同江印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2006 年 1 月第一版 2006 年 1 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 16.75 印张 378 千字

印数 0001—3000 册 定价 26.00 元

版 权 专 有 翻 印 必 究

(本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换)

前 言

光纤通信技术的飞速发展，在原有的点对点的光纤通信系统的基础上，已发展成各种制式的光纤通信网络系统。而且，新技术还在不断地涌现。不仅在电信系统，而且在电力、铁路运输、矿业开采等行业，都获得了广泛的应用。不仅如此，在电信和电力系统中相继建成了全国规模的网络系统。目前，正在向着电信的 IP 电话业务，计算机数据传输业务，以及有线电视的图像传送业务三网合一的目标迈进。

在电力系统中，发电厂、高低压输变电系统以及相应的继电保护系统先后采用了光纤通信技术，而且还先后建成了相当规模的光纤通信网络系统。国调、网调、省调、地(市)调和县调间频繁的调度命令(电话)，各所属厂、站间相关信息采集的计算机数据的上传与下达、电话电视会议视频信号的传输，以及各种电话业务的往来，都是通过电力系统中的光纤通信网络进行传输的。在电力系统中，继电保护信号的传输，由于其对传输质量的要求极为严格，所以还采用专用的光纤通信线路——64kb/s 和 2Mb/s 通道，进行传输的。为了相关信息的采集和传输的可靠性，在电力系统中，还要建立相应的同步网络系统和网管监控系统。所有这些系统的相关信息的传输，都是通过电力系统中的光纤通信网络进行传输的。随着信息量的不断增多，在电力系统中的光纤通信网络中，还要不断地采用光纤通信的新技术，例如波分复用(WDM)和密集波分复用(DWDM)技术，以便达到扩容和增速的目的。另外，在电力系统中的光纤通信网络中，还要准备迎接全光信息时代和三网——电信电话网、计算机数据网和视频图像网络合一时代的到来。

对照目前我国电力系统中光纤通信网络建设的现状，特别有些地区由于地理和历史的原因，还在继续使用微波传输信息的情况，我国电力系统中光纤通信网络建设者今后的任务还任重而道远！

本书是作者在天津大学电力培训中心和山东省电力研究院讲学用教材的基础上编写的。作者对上述两单位的负责人林孔元和王超等同志给予的热情支持和帮助，以及他们提供的宝贵建议和设备完善的教学条件表示衷心感谢！

本书由王延恒主编。贺家李教授负责第九章第十一节的编写工作；北京四方继保自动化股份有限公司高级工程师徐刚负责第七章第九节和第十节的编写工作；其他章节均由王延恒负责编写，并负责全书的统稿工作。

本书的电子编辑工作和部分书稿的校对工作，是由王黎明同志负责的。作者对他给予的帮助，甚表谢意！

由于作者的水平有限，编写的时间又仓促，错误在所难免。因此，希望广大读者给予

批评指正。

本书在编写过程中，多处引用了参考资料中有关的图或表，敬希有关文献的作者给予谅解，谢谢！

作者

2005年6月于天津大学

目 录

前言

第一章 概述	1
第一节 光纤通信的发展简史.....	1
第二节 光纤通信的优点.....	2
第三节 光纤通道的构成.....	3
第二章 光纤与光缆	4
第一节 光纤的构造.....	4
第二节 光纤的分类.....	4
第三节 光在光纤中的传播.....	5
第四节 光纤的光学特性.....	6
第五节 光纤的损耗特性.....	7
第六节 光纤的色散特性.....	7
第七节 光缆.....	9
复习思考题.....	9
第三章 光发射机	10
第一节 半导体激光器的工作原理.....	10
第二节 半导体激光器(LD)的主要特性.....	13
第三节 半导体发光二极管(LED).....	15
第四节 激光器(LD)的驱动与控制电路.....	16
复习思考题.....	22
第四章 光接收机	23
第一节 PIN.....	23
第二节 APD.....	23
第三节 光电检测器的主要技术指标.....	25
第四节 前置放大器.....	28
复习思考题.....	29
第五章 光纤通信系统	30
第一节 光纤通信系统中的复用方式.....	30
第二节 波分复用.....	30
第三节 光纤通信系统中一些技术指标.....	34
复习思考题.....	35
第六章 光路无源器件	36
复习思考题.....	40

第七章 电力系统中光纤通信的同步和继电保护信息的传送	41
第一节 同步在通信系统中的重要作用	41
第二节 光纤通信系统中数据通信的基本方式	43
第三节 位同步	46
第四节 帧同步	52
第五节 网同步	60
第六节 中国电信数字同步网	67
第七节 中国电力通信同步网	75
第八节 同步网中 PCM 系统的业务内容和帧结构	90
第九节 光纤保护接口技术	92
第十节 光纤通道切换技术	100
第十一节 继电保护通道的实时监测系统	104
复习思考题	110
第八章 光纤通信网和发电厂内的光纤通信	112
第一节 SDH 传输网	112
第二节 ATM 网	123
第三节 MPLS 网	130
第四节 自愈网	137
第五节 局域网—用户接入网	139
第六节 光纤同轴电缆混合网 (HFC)	154
第七节 光纤网在电力系统中的应用	160
复习思考题	168
第九章 数据传输中的差错控制和高压电网中的光纤通信	169
第一节 高压电网中光纤通信的任务	169
第二节 数据传输中的差错控制	173
第三节 常用检纠错编码	177
第四节 线性分组码	181
第五节 循环码	188
第六节 长距离、高码速光纤通信中的检、纠错编码	200
第七节 网调、省调高压 (330 ~ 500kV) 电网中的光纤通信	205
第八节 330 ~ 500kV 超高压电网中光通信用光缆——OPGW	216
第九节 110 ~ 220kV 高压电网中光通信用的 ADSS 光缆	231
第十节 光缆断缆故障断纤点的寻找和修复	242
第十一节 复合光缆架空地线的短路电流计算和截面选择	243
复习思考题	257
参考文献	259

第一章 概 述

第一节 光纤通信的发展简史

光波是波长极短的电磁波。因此,科学家早已断定利用光波进行通信在理论上是可行的,也是人们长期以来梦寐以求的。光波的频率在 3×10^{14} Hz 以上,用这样高频率的光作为载波,可获得比现有通信方式大万倍的通信容量,又不受一般的电磁干扰,因而是一种理想的传输介质。但是如何使光波沿着预定的通道长距离传输却是一个极难的问题。只是当激光和光导纤维问世之后,才使这一难题的解决成为可能。

利用光纤作为光的传输介质的研究工作经历了约 30 年的时间。早在 1950 年国外就有人开始了光在光纤中传输的理论研究。1951 年出现了用于医疗的光导纤维。但由于那时的光纤中光的传输损耗太大,故不能用于一定距离的光通信。1966 年,英籍华人高锟博士揭示了制成损耗低于 20dB/km 光纤的可能性。而当时世界上最优良的光学玻璃损耗在 1000dB/km 左右,因而这个预见未被普遍相信和重视。只有美国贝尔实验室主席 lam Ross 和英国电信研究所 (BTRL, BPO) 的领导人对此极感兴趣,遂与美国康宁玻璃公司合作研制。至 1970 年该公司的 Maurer 等人首先制成了损耗为 20dB/km 的光纤,取得了重大突破。高锟博士指出,降低玻璃内的过渡金属杂质离子是降低光纤损耗的主要途径。沿此途径,在 1974 年光纤损耗已降低到 2dB/km。另外,玻璃内的 OH 离子也是造成损耗的重要因素。解决此问题后,到 1980 年用于 1.55 μ m 波长的光纤损耗值已降低到 0.2dB/km。

实现光纤通信的另一重要问题是光源。20 世纪 60 年代,光纤通信的研究主要应用波长为 0.85 μ m 附近的近红外区。因此,当时主要研究 GaAlAs (镓铝砷) 半导体激光器。这种激光器不能在室温下运用,寿命很短。经过长时间艰难地研究工作,到 1970 年 Hayashi 等人终于制成了能在室温下连续运行的 GaAlAs 激光器。与此同时,1971 年 Burrus 等人制成了 GaAlAs 发光二极管 (LED),其寿命长、价格低廉,但频谱宽、速率低、功率小。80 年代制成了适用于 1.3 μ m、1.55 μ m 的 InGaAsP (铟镓砷磷) 长波长激光器和发光管,现已广泛应用。

光接收器件也是光纤通信必不可少的重要组成部分。随着光纤的发展,研制成功了适用于短波长的 Si-PIN 管和 Si-APD 雪崩光电二极管及适用长波长的 InGaAs/InP 的 PIN 管和 APD 管,还有 Ge-APD 管等。

1976年后,美国建成传输速率为44Mb/s、传输距离达到10km的商用光纤通信线路。20世纪80年代,光纤通信进入大规模发展阶段。目前世界上光纤通信已被广泛应用,全世界光纤用量每年约6000万~7000万km。国际上565Mb/s的高速光纤通信系统已广泛应用,2.4Gb/s超高速系统早已投入运行。

我国早在20世纪70年代初就开展了光纤通信的研究。70年代末已经能制造1.3 μ m波长、衰减为4dB/km的多模光纤,并能制造0.85 μ m波长的发光二极管和激光器。80年代初,研制成长波长多模光纤、长波长激光器和PIN-FET光电检测组件,在武汉建立了市内光纤线路。1991年,建成合肥至芜湖的150km光纤线路。目前全国每年光纤用量约在550万km以上。国产的光纤衰减可低至0.34dB/km,年产量已超过100万km。由此可见,我国光纤通信的发展非常迅速,在电力系统中也得到了广泛的应用。

进入90年代后,光纤通信事业又进入了一个快速发展时期。波分复用(WDM)技术及其相应的复用设备获得了广泛的应用。随着密集波分复用(DWDM)、粗波分复用(CWDM)等技术的相继问世,同步数字体系(SDH)、异步传输模式(ATM)、多协议标记交换(MPLS)技术和光纤同轴混合网络(HFC)技术等,获得了迅速的发展和广泛的应用。目前,全国性的SDH光纤网已初步形成。G.655(非零色散位移单模光纤)和G.656(宽带光传输用非零色散单模光纤)的问世,并与上述技术结合,使我国光纤通信事业的扩容、提速又进入了快车道。现在,全国的光纤通信事业,正在向着语音、数据和图像三网合一的方向迈进。光孤子通信、量子通信和全光网络等技术的研究工作,也在不断地取得进展。

除电信行业外,电力系统、铁路系统,以及矿业系统等,也都在广泛和大量地采用光纤通信技术。其中,电力系统、铁路系统等还在向全国网络建设方面快速迈进。

第二节 光纤通信的优点

光纤通信与其他通信方式比较有很多优点,主要有以下几点:

(1) 频带宽、通信容量大。随着电力系统保护、控制、远动技术的发展,需要越来越大的通信容量。微波通道的通信容量一般具有960路,而用光缆构成的光纤通道当用0.85 μ m短波长时通信容量可达1920路,当用1.55 μ m长波长时通信容量可达7680路。光纤通信与电缆或微波通信传输能力的比较,如表1-1所示。

表1-1 光纤通信与电缆或微波通信传输能力的比较

通信手段	传输容量(话路)(条)	中继距离(km)	1000km内中继器个数
微波无线电	960	50	20
小同轴	960	4	250
中同轴	1800	6	166
光缆	1920	30	33
光缆	14000(1Gb/s)	84	11
光缆	6000(445Mb/s)	134	7

(2) 工作可靠、重量轻。载波通道受雷电和电力系统操作产生的电磁干扰很大，信号衰耗受天气变化的影响很大，有时甚至不能工作。微波通道受电磁干扰较小，但在恶劣天气条件下信号衰减很大。光纤通道不受电磁干扰，基本上不受天气变化的影响，因此工作可靠性远高于载波和微波通道。这对于电力系统特别重要。光缆和电缆的重量和截面积比较，如表 1-2 所示。

表 1-2 光缆和电缆的重量和截面积比较

项 目	8 芯		18 芯	
	光 缆	电 缆	光 缆	电 缆
重量(kg/m)	0.42	6.3	0.42	11
重量比	1	15	1	26
直径(mm)	21	47	21	65
截面积比	1	5	1	9.6

目前，提速后的光纤传输速率已提高到 Gb/s 和 Tb/s 数量级。按 64Kb/s 一个话路计算，那么在一根速率为 10Tb/s (10×10^{12} b/s) 的光纤上，能够同时传输多少话路便可一算而知。

第三节 光纤通道的构成

图 1-1 示出光纤通信系统构成框图，图中示出了通道的一个传输方向，向反方向传输的结构与此完全相同。图中发端的电端机是常规的通信发送设备，用于对信息信号进行处理，例如进行模数转换、调制和多路复用等。发端的光端机内有作为光源的激光器或发光器或发光二极管，其作用是将电信号调制到光信号上。然后将经过调制的光源输入光纤，向对端传输。光信号在传输途中要经过多次中继器的整形和放大，以恢复其形状和强度，再向前传输。中继器的间隔大约为 50~70km。中继器的原理是用光检测器将光信号变成电信号，经过整形放大后，再变成光信号，在收端正好相反。经光纤传来的光信号经光检测器后变成电信号，再经收端电端机的解调，恢复成发端信号的信号形状。

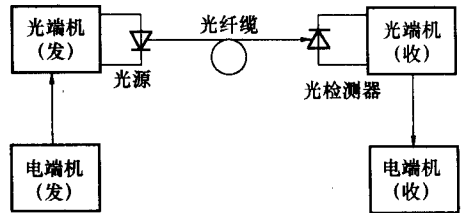


图 1-1 光纤通信系统构成框图

第二章 光纤与光缆

第一节 光纤的构造

光纤的构造如图 2-1 所示。它是由纤芯、包层、涂敷层及套塑四部分组成。

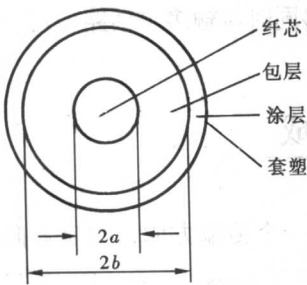


图 2-1 光纤的构造

纤芯位于光纤的中心部位。它的主要成分是高纯度的二氧化硅。其纯度要达到 99.9999%。其余成分为掺入的极少量掺杂剂，如五氧化二磷 (P_2O_5) 和二氧化锗 (GeO_2)。掺杂剂的作用是提高纤芯的折射率。纤芯的直径 $2a$ 一般为 $5 \sim 50\mu m$ 。包层也是含有少量掺杂剂的高纯度二氧化硅。掺杂剂有氟或硼。这些掺杂剂的作用是降低包层的折射率。包层的直径 (包括纤芯在内) $2b$ 为 $125\mu m$ 。包层的外面涂敷一层很薄的涂敷层。通常要进行两次涂敷。它的作用是增强光纤的

机械强度。目前涂敷层的材料一般为环氧树脂或硅橡胶。涂敷层之外就是套塑。它的作用也是加强光纤的机械强度。套塑的原料大都采用尼龙或聚乙烯。

第二节 光纤的分类

一、阶跃型光纤与渐变型光纤

根据光纤芯部与包层折射率的分布情况,光纤分为以下两大类:

1. 阶跃型光纤 (SI-Step index fiber)

这种光纤芯和包层的折射率均为常数,其界面处呈阶跃式变化,如图 2-2 所示,其中 n_1 是芯的折射率,分布是均匀的,其值略高一些,例如 $n_1 = 1.51$ 。 n_2 是包层的折射率,分布也是均匀的,其值略低一些,例如 $n_2 = 1.50$ 。二者之差 $\Delta n = n_1 - n_2 = 0.01$ 。芯的直径是 $2a$,对于多模光纤,其值为 $50\mu m$;对于单模光纤,则为 $5 \sim 10\mu m$ 左右。包层直径为 $2b$,一般为 $125\mu m$ 。

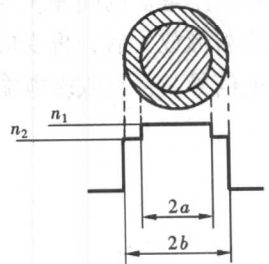


图 2-2 阶跃光纤的横截面和折射率分布

2. 渐变型光纤 (GI-Graded index fiber)

渐变型光纤又称梯度型光纤。这种光纤的折射率在包层部分是均匀分布的, 即 n_2 为一常数。但在芯部, 其分布则由包层起逐渐增大, 并在芯的中心处达到最大值 n_1 , 或者说渐变型光纤芯部折射率是其半径 r 的函数 $n(r)$, 如图 2-3 所示。

二、多模光纤与单模光纤

根据电磁场理论, 光纤中存在着许多不同的传输模式, 即不同的电磁场分布。按照传输模式的多少, 光纤又可分为以下两类:

1. 多模光纤 (MM-Multi mode fiber)

当光纤中传输的模式是多个时, 即存在多个电磁场分布时, 则称为多模光纤。多模光纤剖面折射率的分布, 有阶跃型的, 也有渐变型的。前者称为阶跃型多模光纤, 后者称为渐变型多模光纤。

2. 单模光纤 (SM-Single mode fiber)

光纤中只能传输一个模式, 即只存在一种场分布的光波时, 这种光纤称为单模光纤。实现单模传输的光纤, 要求其芯径 $2a$ 很小, 通常 $2a = 5 \sim 10 \mu\text{m}$ 。芯径这样细的光纤, 由于工艺上的困难, 其折射率的分布只能是均匀的。因此, 单模光纤剖面折射率的分布属于阶跃型的, 如图 2-4 所示。

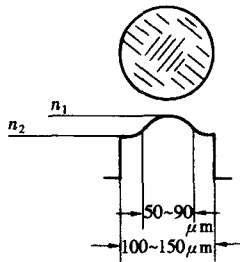


图 2-3 渐变型光纤的横截面和折射率分布

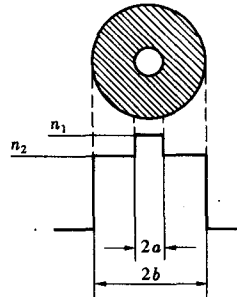


图 2-4 单模光纤的横截面及折射率分布

第三节 光在光纤中的传播

由于光纤是由纤芯和包层构成, 而且其纤芯的折射率 n_1 高于包层的折射率 n_2 , 因此, 当光入射到光纤的芯子之后, 在纤芯与包层界面处满足全反射条件的光线, 将在纤芯与包层之间形成全反射, 于是光便在光纤中沿光的轴向向前传播, 如图 2-5 所示。图

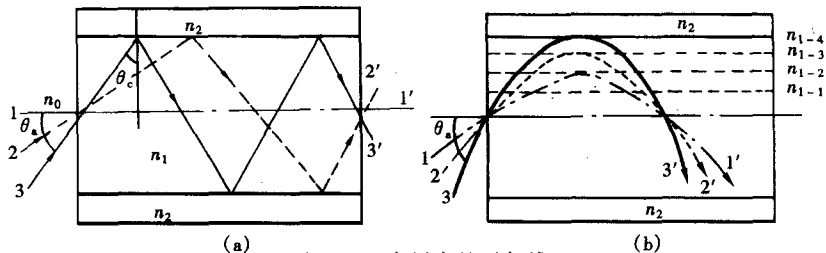


图 2-5 光纤中的子午线
(a) 阶跃光纤; (b) 渐变光纤

中渐变光纤中的光，其传播途径呈曲线状的原因，是由于其纤芯的折射率呈渐变状，光在其中不断地产生折射，从而使光的途径变为曲线状。单模光纤中的光，其传播途径几乎是沿纤芯的轴心。

第四节 光纤的光学特性

一、光纤的数值孔径

数值孔径 (NA) 是衡量一根光纤当光线从其端面射入时，它接收光能大小的一个重要参数，或者说数值孔径 (NA) 是反映光纤捕捉光线 (或集光) 能力大小的一个参数，如图 2-6 所示。从几何光学角度看，并不是所有从空气射向光纤端面的光都能在光纤中满足全反射条件而传播。只有位于入射光线与光纤轴线间夹角为 θ_a 的圆锥体之内的那些光线，才能在光纤内满足全反射条件被光纤捕捉而形成传导模。位于这个圆锥体之外的光线，尽管它们也能够入射到光纤之内，但它们不能满足入射角大于临界角的全反射条件，所以不能在光纤内形成全反射而传播，只能折射到光纤的包层而形成辐射模。角度 θ_a 的正弦 $\sin\theta_a$ 称为光纤的数值孔径，以 NA 表示。

$$NA = \sin\theta_a = n_1\sqrt{2\Delta} \quad (2-1)$$

这就是光纤数值孔径的定义式，称为光纤的最大理论数值孔径。

由式 (2-1) 可以看出，光纤的数值孔径 (NA) 与其相对折射率差 Δ 有关。 Δ 值越大，数值孔径 NA 也越大，表明此时光纤捕捉光线 (聚光) 的能力很强。从光源与光纤耦合的观点来看，数值孔径 (NA) 值越大越好，因为这时可提高光源与光纤的耦合效率。但是，在后面讨论光纤的色散或带宽特性时会发现， Δ 值或数值孔径 (NA) 值太大会使光纤的色散增加或带宽降低。因此，CCITT (国际电报电话咨询委员会) 规定，NA 的取值范围为 $NA = 0.15 \sim 0.24$ ，其允许误差为 ± 0.02 。我国一般取 $NA = 0.2 \pm 0.02$ 。

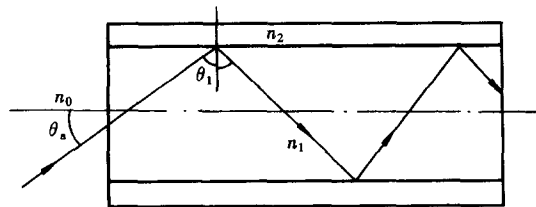


图 2-6 光纤的数值孔径

二、光纤的折射率分布

光纤剖面 (横断面) 的折射率分布，是表征光纤光学特性的另一个重要参数。通常用剖面指数 α 描述。光纤的折射率分布不仅与它的数值孔径有关，而且与光纤的色散特性也有关。为了减少光纤的色散或提高其传输带宽，需要合理设计光纤的折射率分布。

第五节 光纤的损耗特性

一、光纤损耗产生的原因及分类

光在光纤中传输时要衰减。这种衰减称为光纤的损耗。引起光纤损耗的原因很多，归纳起来大致可以分为两大类：吸收损耗和散射损耗，如图 2-7 所示。

二、光纤损耗的谱特性及工作窗口

由于光纤存在多种损耗，使它的总损耗谱特性曲线呈现图 2-8 的形状。由图 2-8 可知，由于 OH^- 根离子的吸收作用，使光纤的损耗谱特性在 $0.7 \sim 1.6 \mu\text{m}$ 之间，出现三个损耗高峰。在每两个损耗高峰之间，有一个相对低的损耗区域。这三个损耗低的波段区域被人们选作光纤通信的可用波段，称为第一窗口、第二窗口和第三窗口。它们位于红外吸收和紫外吸收间的瑞利散射区域之内。由于光纤拉制技术水平的提高， OH^- 根离子的吸收作用变得很小，使光纤损耗谱特性在 $0.7 \sim 1.6 \mu\text{m}$ 之间的三个损耗高峰几乎被削平，使在 $0.7 \sim 1.6 \mu\text{m}$ 之间几乎都成为可用的窗口，为波分复用技术的使用创造了条件。

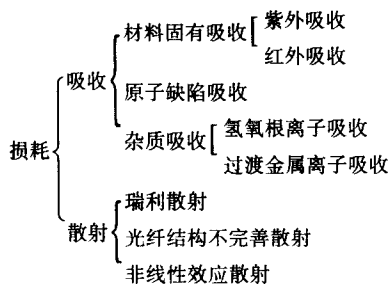


图 2-7 光纤的损耗

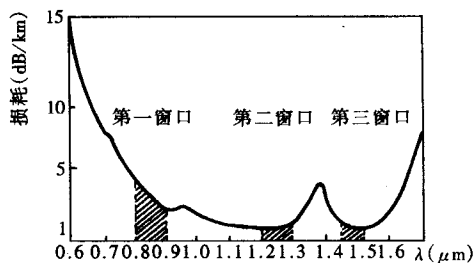


图 2-8 光纤的总损耗谱特性及工作窗口

第六节 光纤的色散特性

一、光纤中的色散现象与危害

光纤中的色散是指当光纤传输脉冲信号时，例如光纤的数字通信，脉冲信号在传输过程中被展宽的现象。解释光纤中的色散现象，采用几何光学的分析方法比较直观。

如图 2-9 所示，在多模阶跃型光纤的输入和输出端，光脉冲波形是光线 1 和光线 2 传输的脉冲波形的合成结果。在输入端，光线 1 和光线 2 的输入脉冲及其合成脉冲，如图 2-9 (b) 所示。光纤中光的传播速度为

$$v = c/n_1 \quad (2-2)$$

式中： c 是光在真空中的传播速度； n_1 是光纤芯的折射率。

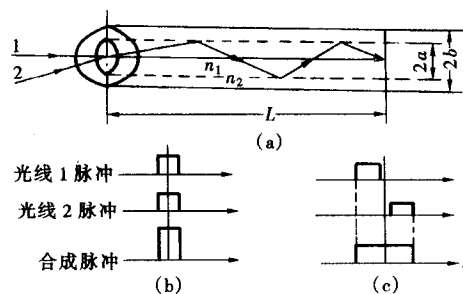


图 2-9 光纤中的脉冲被展宽

(a) 光在光纤中传输；(b) 入射端光脉冲；
(c) 出射端光脉冲

由图 2-9 (a) 可知, 光线 1 走直线, 而光线 2 则走锯齿形路线, 其传输的路径比光线 1 长。显然, 尽管两光线的传播速度一样, 但由于传输路径的长短不一, 两光线所携带的光脉冲到达光纤终端的时间就不一样, 光线 1 的脉冲先到, 而光线 2 的脉冲后到。这样, 其合成后的光脉冲波形就被展宽, 如图 2-9 (c) 所示。光纤的色散现象对光纤通信是极为不利的。光纤数字通信传输的是一系列脉冲码。由于光纤在传输过程中能把脉冲展宽, 于是就要出现脉冲与脉冲相重叠的现象, 称为码间干扰。由于码间干扰, 而形成传输码的失误, 造成差错。为了避免误码出现, 就要拉长脉冲的间隔, 导致传输速率降低, 从而减少了通信容量。另一方面, 光纤对脉冲的展宽程度, 随着传输距离的增长而越来越严重。因此, 为了避免误码, 光纤的传输距离也要缩短。可见, 由于光纤存在色散现象, 不仅影响了光纤的传输容量, 也限制了光纤的传输距离。

二、色散产生的原因与分类

根据产生的原因, 光纤的色散可以分为以下三类:

1. 模式色散

对光纤进行理论分析, 可以采用几何光学法, 也可以采用波动光学法, 或电磁场理论分析法。用几何光学法分析时, 可以认为光纤中传输的是许多条射线, 如图 2-9 (a) 所示。用电磁场理论分析时, 认为光纤中传输的是各种不同模式场。因此光纤中的每一条射线可代表一定的模式。这样, 对光纤的模式色散就好理解了。

光纤的模式色散, 只存在于多模光纤中, 由于多模光纤中存在许多传输模式, 而每一种传输模式到达光纤终端的时间先后不同, 造成光脉冲展宽, 从而出现色散现象。这种由于传输模式引起的色散, 称为模式色散。

2. 材料色散

光在光纤中的传播速度为 $v = c/n_1(\lambda)$, 其中 $n_1(\lambda)$ 是光纤芯的折射率。它是光波波长的函数。即同一材料对不同波长的折射率是不一样的, 如图 2-10 (a) 所示。因此, 当含有不同波长的光脉冲 (非单色光) 通过光纤传输时, 其传输的速度就不一样, 如图 2-10 (b) 所示。这时, 光脉冲要被展宽出现色散。光纤材料引起的色散, 称为材料色散。

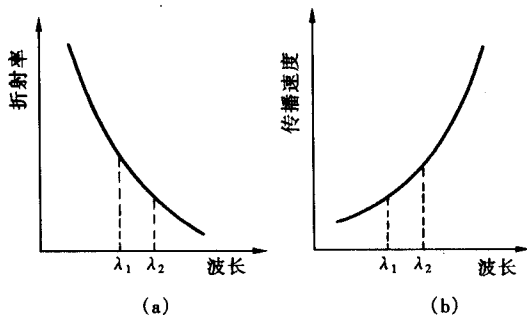


图 2-10 光纤中的材料色散起因

(a) 波长增大折射率下降; (b) 波长增大光速上升

3. 波导色散

这种色散又称为结构色散。它是由光纤的几何结构决定的色散, 其中光纤的横截面尺寸起主要作用。光在光纤中通过芯与包层界面的全反射作用, 被限制在纤芯中传输。由于波导结构不完整, 例如横向尺寸沿光纤轴的波动, 除导致模式间的模变换外, 还有可能引起一部分频率高或波长短的光线进入包层。由于包层的折射率低于芯部

的折射率，于是包层中光脉冲的传播速度要大于芯部中光脉冲的传播速度。这样，光脉冲就要被展宽形成色散。这种色散称为结构色散或波导色散。

三种色散，哪种是主要的呢？这要视光纤的类型而定。对于多模光纤，模式色散和材料色散是主要的，而波导色散则可忽略不计。对于单模光纤，由于它只传输单一模式的光，所以不存在模式色散。这时，材料色散与波导色散便是主要的了。

第七节 光 缆

光纤在实际的通信应用中，都要制作成光缆。光缆分为单芯光缆与多芯光缆。多芯光缆又有四芯、六芯、八芯……之分。

光纤成缆后，要有足够的机械强度。为此在光缆中除必要的纤芯数量外，还应有增强光缆机械强度的加固件。通常，加固件是多股的钢丝绳。另外，光纤只能传输光信号而不能传输电信号。为了保证中继站间电信号的联系，或为了保证无电源供给的中继站电的供应，在光缆中通常还有一对塑料包层的铜线，光缆的具体结构，应根据不同的需要进行设计。图 2-11 所示为通信用的一种六芯光缆的剖面图。

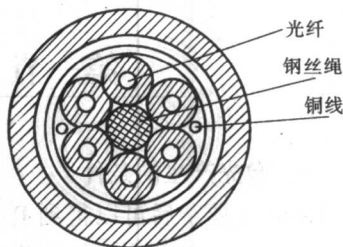


图 2-11 六芯光缆剖面图

复 习 思 考 题

1. 光纤在折射率分布上分为几个类型？
2. 单模光纤是阶跃型光纤？还是渐变型光纤？
3. 单模光纤与多模光纤有哪些区别？
4. 光纤为什么要做成光缆？
5. 什么叫光的全反射？
6. 光纤利用光的哪个特性来进行光的传输的？
7. 光纤的损耗是怎样形成的？它有什么危害？
8. 光在光纤中传输的先决条件是什么？为什么光纤的设计要使其芯部的折射率大于包层的折射率？
9. 光纤的数值孔径 NA 表示什么意思？
10. 色散主要分哪几种类型？单模光纤中有模式色散吗？
11. 光纤的三个工作窗口是什么意思？工作波长 $\lambda = 1.3\mu\text{m}$ 的光纤，使用的是光纤的哪个工作窗口？现在这三个工作窗口还存在吗？

第三章 光 发 射 机

第一节 半导体激光器的工作原理

一、激光产生的条件

GaAs 高掺杂后可以得到 P 型和 N 型半导体。当这两种半导体结合在一起时，N 区的电子向 P 区扩散，在靠近界面的地方，留下了带正电的离子；同时，P 区的空穴也要向 N 区扩散，结果在靠近界面的地方剩下带负电的离子。这样，在 P 和 N 型半导体交界面的两侧，便形成了带相反电荷的“空间电荷区”，在 P-N 结中形成一电场，叫自建电场，其方向由 N 区指向 P 区，如图 3-2 所示。不同掺杂时产生的辐射波长如图 3-1 所示。

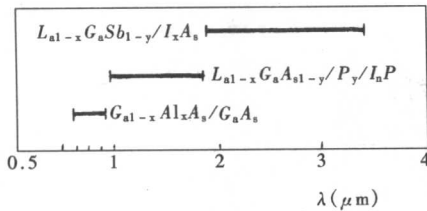


图 3-1 采用三元、四元化合物半导体材料的波长范围 (x, y 在 0~1 范围变化, 符号“/”右侧表示衬底材料)

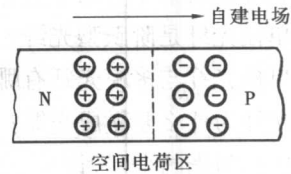


图 3-2 P-N 型半导体交界面两侧的空间电荷区

在自建电场的作用下，电子与空穴发生漂移运动，其方向正好与其扩散方向相反。当达到动态平衡时，P-N 结空间电荷区的自建电场便在 P、N 型半导体两部分之间形成电位差或电位势垒，称为接触电位差，以 V_D 表示。这表明，P 区相对于 N 区的电位差为 V_D 。因此，P 区中的所有电子，都要由此而具有一个附加的电位能 eV_D 。反映在能带图上，使整个 P 区的能带升高 eV_D ，如图 3-3 (a) 所示。

由于高掺杂，空间电荷区的正负电荷很多，所以电位差 V_D 很大，以至于使 N 型半导体导带底部的能级 $(E_C)_N$ 比 P 型半导体价带顶部的能级 $(E_V)_P$ 还要低。能级越低，电子占据的可能性越大。