

# 光纤通信系统 与光纤网

■ 王延恒 王黎明 编著



天津大学出版社  
TIANJIN UNIVERSITY PRESS

# 光纤通信系统

## 与光纤网

王福海 王智明 编著

人民邮电出版社  
POST & TELECOM PRESS

# 光纤通信系统与光纤网

王延恒 王黎明 编著

 天津大学出版社  
TIANJIN UNIVERSITY PRESS

## 内 容 提 要

本书介绍了光纤通信系统中的各个主要组成部分及其主要技术指标,同时对计算机数据通信光纤数据传输中的同步问题及差错控制问题也作了一般的介绍。对于近几年发展起来并已成熟的各种光纤通信网以及发展速度很快虽未成熟但极具发展前途的几种光纤通信新技术,本书也作了简单介绍。

本书可作为通信专业大学本科生的教材,也可以作为通信专业研究生及相关技术人员的参考用书。

## 图书在版编目(CIP)数据

光纤通信系统与光纤网/王延恒,王黎明编著. —天津:

天津大学出版社, 2007. 2

ISBN 978-7-5618-2416-0

I. 光... II. ①王... ②王... III. ①光纤通信 - 通信系统  
②光纤通信 - 通信网 IV. TN929.11 TN915

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 015716 号

出版发行 天津大学出版社  
出 版 人 杨欢  
地 址 天津市卫津路 92 号天津大学内(邮编:300072)  
电 话 发行部:022-27403647 邮购部:022-27402742  
网 址 www.tjup.com  
短信网址 发送“天大”至 916088  
印 刷 廊坊市长虹印刷有限公司  
经 销 全国各地新华书店  
开 本 185mm × 260mm  
印 张 24.75  
字 数 634 千  
版 次 2007 年 2 月第 1 版  
印 次 2007 年 2 月第 1 次  
印 数 1 - 4 000  
定 价 38.00 元

# 前 言

光纤通信技术的飞速发展,在原有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。在应用方面,不仅在电信行业,而且在电力、铁路运输、矿业开采等系统,也都获得了广泛的应用。不仅如此,在电信和电力系统还相继建成了全国规模的网络系统。目前,正在向着电信方面的 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。

另外,电信、电力系统,除了建成全国规模的光纤通信网络系统外,还相继建起了相应的网络监控系统,以确保通信的可靠性。为了同样的目的,中国电信、中国网通、中国移动、中国联通和中国铁通等各大通信网络系统,在全国范围内,也先后建起了各自的同步网络系统。

在光波分复用技术方面,近几年也取得了突破性的进展。不仅技术已经成熟,而且光波分复用(WDM)、密集波分复用(DWDM)等技术在已有的和正在建设的光纤线路中,在扩容和提速方面发挥了极大的作用。粗波分复用技术(CWDM)在城域网的建设中,也将发挥其应有的作用。

近几年来,在天津大学电力培训中心和山东省电力研究院等单位,作者在为电力系统在职技术人员讲解光纤通信技术的过程中,由于工作的需要,接触了不少有关光纤通信方面的实际问题。同时,为了同样的目的,也查阅和收集了不少有关这方面的资料。出于长期从事教学工作的本能反应,深感自己有责任和义务,将这些宝贵的有关光纤通信方面的新技术和新知识传授给广大从事光纤通信的青年朋友们。同时,作者原编著的《光纤通信技术基础》一书,至 1998 年,已由天津大学出版社印刷了四次。在光纤通信技术发展到今天的情况下,其内容已显得陈旧,特别是 20 世纪 90 年代后发展起来的一些新技术,在原书中没有反映出来。基于以上两个原因,在脑海中萌生了编写本书的念头。幸好,在天津大学出版社的大力支持下,使我们的这一愿望才得以实现!

本书共分十章。第一章为概述。第二章介绍了光纤的构成、传光原理及光纤的光学特性和损耗特性。由于现代光纤通信主要使用的是单模光纤,并且新型的、性能优良的单模光纤又不断出现,所以本章的最后对单模光纤的偏振问题又进行了一定的讨论。第三章介绍的内容为光发射机的主要组成部分以及其主要部件激光器(LD)、发光二极管(LED)的构造及工作原理,对于它们的特性及运用以及它们的调制和控制电路也作了简单的介绍。第四章主要介绍了光接收机的各个组成部分,重点讨论了光电二极管 PIN 和雪崩光电管 APD 的构成、工作原理,以及它们的特性和应用。对于光接收机的前置放大电路以及光接收机的主要技术指标,书中也作了简单的介绍。第五章的内容为光纤通信系统的主要组成部分以及其相应的辅助系统、中继站等。对于光纤通信系统中的调制方式、使用的码型以及系统的主要技术指标等也分别作了简单的介绍。对于近几年发展起来的几种光波分复用新技术,在书中作了较详细的介绍。第六章介绍的内容为光路中的各种光无源器件以及光波导等内容。第七章和第九章对计算机数据通信光纤数据传输中的同步和差错控制问题也分别作了一般的介绍,其中对我国目前各大通信网已建立起来的各自的同步网也分别作了一般的介绍。第八章对我国已建立起来

并已投入使用的各种光纤通信网分别作了较详细的讨论。第十章对近几年发展很快且极具实用价值的一些光纤通信新技术内容,例如,光孤子通信技术、掺铒光纤放大器、光纤喇曼放大器、半导体放大器、全光通信网及其相关的重要技术、弹性分组环(RPR)技术以及量子通信等新技术,也分别进行了一定的介绍。

本书由王延恒主编。王黎明、孙俏文负责第七、第八章及第九章第五节的编写工作。北京四方继保自动化股份有限公司徐刚负责第五章第二节的编写工作。其他章节由王延恒负责编写。书中部分插图由王连英完成。全书的电子录入工作由王秉明完成。

天津大学电信学院的戴居丰、张雅绮、孙学军和电力培训中心的林孔元四位教授帮助完成了本书讲课稿的编写工作。金杰教授试讲后,提出许多宝贵意见。

老教授、师长杨恩泽和李希曾作为本书的编写顾问,发挥了重要作用。

作者对协助完成本书编写工作发挥了重要作用的上述各位教授、高工表示衷心的感谢!

由于作者的水平有限,错误在所难免,因此,希望广大读者给予批评指正。同时,本书中引用了相关文献中的一些图表,在此向有关文献的作者表示感谢!

编著者  
2006年6月于天津大学

# 目 录

<b>第一章 概述</b> .....	(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)
<b>第二章 光纤与光缆</b> .....	(4)
第一节 光纤的构造 .....	(4)
第二节 光纤的分类 .....	(5)
第三节 光在光纤中的传播 .....	(6)
第四节 光纤的光学特性 .....	(8)
第五节 光纤的损耗特性 .....	(9)
第六节 光纤的色散特性 .....	(12)
第七节 光纤中的场结构与场图 .....	(19)
第八节 单模光纤中的偏振 .....	(24)
第九节 光缆 .....	(33)
复习思考题 .....	(38)
<b>第三章 光发射机</b> .....	(39)
第一节 光纤通信系统对光源的一般要求 .....	(39)
第二节 半导体的发光机理 .....	(40)
第三节 半导体激光器 .....	(43)
第四节 半导体发光二极管 .....	(55)
第五节 LED 的驱动电路 .....	(59)
第六节 激光器的驱动与控制电路 .....	(64)
复习思考题 .....	(72)
<b>第四章 光接收机</b> .....	(73)
第一节 概述 .....	(73)
第二节 光电效应 .....	(73)
第三节 光电二极管 .....	(75)
第四节 雪崩光电二极管 .....	(76)
第五节 光电检测器的主要技术指标 .....	(78)
第六节 前置放大器 .....	(82)
复习思考题 .....	(83)
<b>第五章 光纤通信系统</b> .....	(84)
第一节 光纤通信系统的组成 .....	(84)
第二节 模拟通信系统中的调制方式 .....	(86)

第三节	数字通信系统中的码型	(87)
第四节	光纤通信系统中的复用方式	(98)
第五节	光纤通信系统中的辅助系统	(100)
第六节	中继器	(102)
第七节	光纤通信系统中一些技术指标	(107)
第八节	光纤通信系统的设计	(119)
第九节	光纤通信系统中的波分复用技术	(121)
	复习思考题	(131)
<b>第六章</b>	<b>光路无源器件和光波导</b>	<b>(132)</b>
第一节	概述	(132)
第二节	光路中的无源器件	(132)
第三节	薄膜波导	(139)
	复习思考题	(149)
<b>第七章</b>	<b>光纤通信系统中的同步及中国各大通信网的数字同步网</b>	<b>(151)</b>
第一节	同步在通信系统中的作用	(151)
第二节	光纤通信系统中数据通信的基本方式	(153)
第三节	位同步	(156)
第四节	帧同步	(162)
第五节	网同步	(171)
第六节	中国电信数字同步网	(177)
第七节	中国电力通信同步网	(183)
第八节	通信网的规约、七号信令	(194)
第九节	同步网中 PCM 系统的业务内容和帧结构	(210)
	复习思考题	(212)
<b>第八章</b>	<b>光纤通信网络中的各种光纤通信网</b>	<b>(215)</b>
第一节	同步数字体系传输网	(215)
第二节	异步转移模式网	(225)
第三节	多协议标记交换网	(232)
第四节	自愈网	(239)
第五节	局域网——用户接入网	(248)
第六节	光纤同轴电缆混合网	(274)
第七节	智能网	(281)
	复习思考题	(286)
<b>第九章</b>	<b>数据传输中的差错控制</b>	<b>(288)</b>
第一节	差错控制的必要性	(288)
第二节	常用检纠错编码	(291)
第三节	线性分组码	(296)
第四节	循环码	(302)
第五节	长距离高码速光纤通信中的检纠错编码	(315)



---

第六节 Turbo 码——新一代纠错编码技术 .....	(319)
第七节 超长距离高码速无中继光纤传输技术 .....	(325)
复习思考题 .....	(333)
<b>第十章 光纤通信新技术 .....</b>	<b>(334)</b>
第一节 光纤的非线性效应 .....	(334)
第二节 光孤子通信 .....	(336)
第三节 掺铒光纤放大器 .....	(340)
第四节 光纤喇曼放大器 .....	(345)
第五节 半导体光放大器 .....	(346)
第六节 用于光纤城域网中的新型 RPR 技术 .....	(348)
第七节 全光光纤通信网 .....	(361)
第八节 量子通信 .....	(372)
复习思考题 .....	(376)
<b>附录 通信网的数字同步网 .....</b>	<b>(378)</b>
<b>参考文献 .....</b>	<b>(384)</b>

# 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  $3 \times 10^{14}$  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。只有当激光和光导纤维问世之后,这一难题的解决才成为可能。

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 20 dB/km 光纤的可能性。而当时世界上最优良的光学玻璃损耗在 1 000 dB/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 20 dB/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,到 1974 年,光纤损耗已降低到 2 dB/km。另外,玻璃内的氢氧根离子也是造成损耗的重要因素。解决此问题后,到 1980 年,用于  $1.55 \mu\text{m}$  波长的光纤损耗值已降低到 0.2 dB/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  $0.85 \mu\text{m}$  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。当时制成的这种激光器不能在室温下运用,寿命很短。经过长时间艰难的研究工作,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  $1.3 \mu\text{m}$ 、 $1.55 \mu\text{m}$  的 InGaAsP(铟镓砷磷)长波长激光器和发光管,现已得到广泛应用。

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,及时地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 44 Mb/s、传输距离达到 10 km 的商用光纤通信线路。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 6 000 万 ~ 7 000 万 km。国际上 565 Mb/s 的高速光纤通信系统已广泛应用,2.4 Gb/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 年代末已经能制造用于  $1.3 \mu\text{m}$

波长、衰耗为 4 dB/km 的多模光纤,并能制造 0.85  $\mu\text{m}$  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 150 km 光纤线路。目前全国每年光纤用量约在 550 万 km 以上。由此可见,我国光纤通信的发展非常迅速,在电力系统、铁路系统以及矿业系统等领域也得到了广泛的应用。

进入 20 世纪 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。紧接着密集波分复用(DWDM)、粗波分复用(CWDM)等技术相继问世。与此同时,同步数字体系(SDH)、异步传输模式(ATM)、多协议标记交换(MPLS)技术、光纤同轴混合网络(HFC)技术等,也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,加之与上述技术的结合,使我国光纤通信事业的扩容、提速又进入了快车道。现在,我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

与其他通信方式相比,光纤通信有很多优点,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  $\mu\text{m}$  短波长时通信容量可达 1 920 路,当用 1.55  $\mu\text{m}$  长波长时通信容量可达 7 680 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	通信容量(路/条)	中继距离(km)	1 000 km 内中继器个数
微波无线电	960	50	20
小同轴	960	4	250
中同轴	1 800	6	166
光缆	1 920	30	33
光缆	14 000(1 Gb/s)	84	11
光缆	6 000(445 Mb/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也很大,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落很大。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、铁路等系统特别重要。光缆与电缆的重量和截面积比较,如表 1-2 所示。

表 1-2 光缆与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( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}$ )	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 的数量级。按 64 kb/s 一路计算,那么在一根速率为 10 Tb/s ( $10 \times 10^{12}$  b/s) 的光纤上,能够同时传输多少路一算便知。

### 第三节 光纤通道的构成

图 1-1 所示为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。中继器的间隔为 50~70 km。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

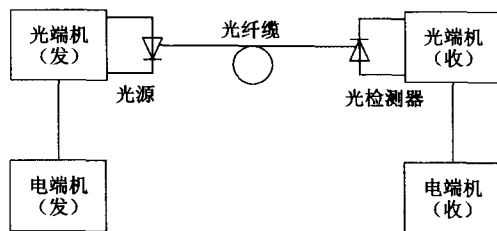


图 1-1 光纤通信系统构成框图

## 第二章 光纤与光缆

光纤通信是以光传递信息。光导纤维(即光纤)是信息传输的主要介质。因此,首先应对光导纤维的构造与分类、传光原理以及有关特性有所了解。在实际的光纤通信中,光纤是以光缆的形式出现的。为此,本章对光缆的结构也作了简单的说明。

光纤的特性包括几何结构特性、光学特性和传输特性等。几何结构特性主要是以其芯与包层的几何尺寸来描述。光学特性用其剖面(或断面)的折射率分布或剖面指数和数值孔径来描述。光纤的传输特性则用其损耗和色散(或带宽)来描述。

光是一种电磁波。光在光纤中的传播,是电磁波在一定介质范围内的传播。因此,本章对光纤某些特性的理论分析采用电磁场理论,即波动光学的方法进行。采用这种分析方法,既可获得有关光纤的模式、截止波长和归一化频率等重要概念,也可对光纤的场结构或场图给出清楚明了的结果。另外,几何光学法也是分析多模光纤某些特性的重要方法,因此,在本章也将采用这种分析方法。

随着光纤通信技术的不断发展,单模光纤将取代多模光纤。因此本章对单模光纤的一个重要特性——偏振,也作了讨论。

### 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。

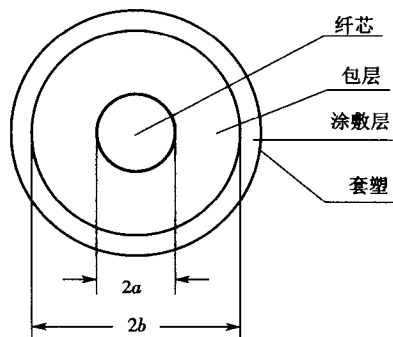


图 2-1 光纤的构造

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 99.999 99%。其余成分为掺入的极少量掺杂剂,如五氧化二磷( $P_2O_5$ )和二氧化锆( $GeO_2$ )。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。掺杂剂一般为氟或硼,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,光纤分为两大类。

#### 1. 阶跃型光纤(Step Index Fiber, SIF)

这种光纤芯和包层的折射率都为—常数,但在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  $50 \mu\text{m}$ ;对于单模光纤,则在  $5 \sim 10 \mu\text{m}$  之间。包层直径为  $2b$ ,一般为  $125 \mu\text{m}$ 。

#### 2. 渐变型光纤(Graded Index Fiber, GIF)

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,即  $n(r)$ ,如图 2-3 所示。

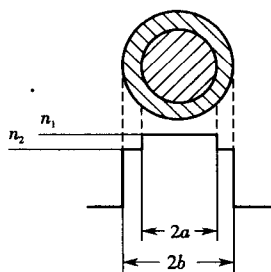


图 2-2 阶跃型光纤的横截面  
和折射率分布

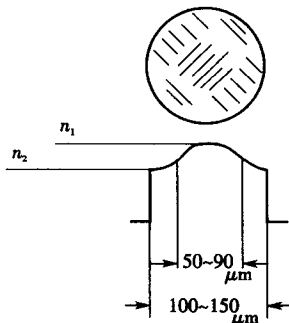


图 2-3 渐变型光纤的横截面  
和折射率分布

### 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(Multi Mode Fiber, MMF)

当光纤中传输的模式是多个,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(Single Mode Fiber, SMF)

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  $2a$  为  $5 \sim 10 \mu\text{m}$ 。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。

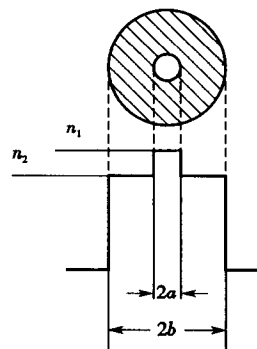


图 2-4 单模光纤的横截面  
及折射率分布

### 第三节 光在光纤中的传播

分析光纤的传光原理有两种方法:一种为波动光学法,另一种为几何光学法。波动光学法是将光波按电磁场理论用麦克斯韦方程组(波动方程)解析其传播特性,在讨论光纤的传光原理和光纤中的模式理论时将采用这种方法。几何光学法是将光波的波长近似为零的波动理论。波动理论变为射线理论,即将光看成是一条条的几何射线。采用射线理论分析光纤的传光原理比较直观,而且可以给出光在光纤中传播的直接概念。完整的射线理论要用射线方程。在讨论光纤的色散特性时,将采用几何光学分析法。为了简述光纤的传光原理,先用光的波动理论概述光波在两种介质分界面处的反射、折射和全反射问题。

#### 一、光的反射和折射

当光从一种介质入射到另一种介质时,由于光在两种介质中传播的速度不同,在两种介质的分界面上要发生反射和折射。如果两种介质材料成分都是均匀的,则其物理常数如磁导率 $\mu$ 和电介常数 $\epsilon$ 也必然是均匀的,设用下标1和下标2分别表示两种介质,其磁导率都等于空气的磁导率,即 $\mu_1 = \mu_0, \mu_2 = \mu_0$ ,其电介常数分别为 $\epsilon_1$ 和 $\epsilon_2$ ,光在两种介质中传播速度各为 $v_1 = \sqrt{\mu_1 \epsilon_1}, v_2 = \sqrt{\mu_2 \epsilon_2}$ ,其对于光的折射率分别为 $n_1 = \sqrt{\epsilon_1}, n_2 = \sqrt{\epsilon_2}$ 。设光的入射角为 $\theta_1$ ,反射角为 $\theta'_1$ ,折射角为 $\theta_2$ ,如图2-5所示,根据电磁场的边界条件,可得

$$\sin \theta_1 / \sin \theta_2 = n_2 / n_1 \quad (2-1)$$

这就是著名的折射定律,称斯奈尔(Snell)定律。在空气中,由于空气的折射率 $n = 1$ ,所以由上式又可得光在任何介质中的传播速度为

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

#### 二、光的全反射

在图2-5中,如果 $n_1 > n_2$ ,表明光波是由光密介质斜入射向光疏介质。由式(2-1)可得 $\sin \theta_1 / \sin \theta_2 = n_2 / n_1 < 1$ 。当 $\sin \theta_1 > n_2 / n_1$ 时,会有 $\sin \theta_2 > 1$ 的结果。这是没有意义的,此时不可能求出任何实数的折射角。事实上,在这种情况下,第二种介质中是没有折射光存在的。

所有入射光在分界面处被全部反射回第一种介质,这种现象称为光的全反射。满足条件 $\sin \theta_c = n_2 / n_1$ 的入射角 $\theta_c$ ,称为临界角,相应的折射角 $\theta_2 = 90^\circ$ 。临界角的大小为

$$\theta_c = \arcsin \frac{n_2}{n_1} \quad (2-3)$$

如图2-6所示,如果此时的人射角 $\theta_1$ 略大于临界角 $\theta_c$ ,则全反射现象就会发生。因此可以得出结论,光波在两种介质分界面处发生全反射的条件是:

- ①光波必须是由光密介质(或折射率高的介质)斜入射到光疏介质(或折射率低的介质);
- ②光波的入射角 $\theta_1$ 必须大于其临界角 $\theta_c$ 。

#### 三、光纤中光的传播

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纤的轴向向前传播,如图2-7所示。图中渐变光纤中的光,

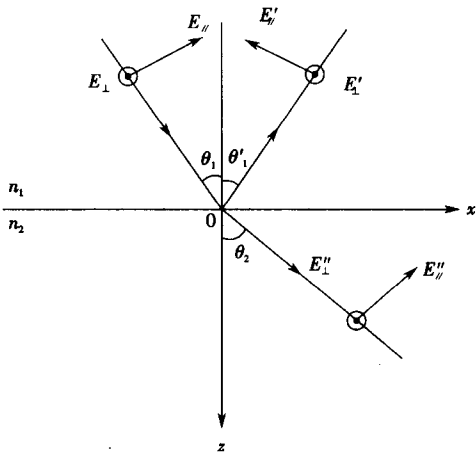


图 2-5 两种介质分界面处光的反射和折射

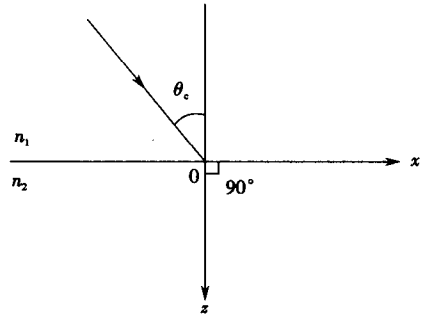


图 2-6 光的临界入射状态

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。

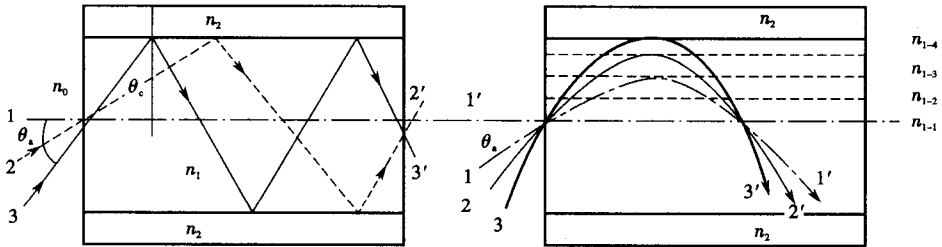


图 2-7 光纤中的子午线

光纤芯子的折射率  $n_1$  和包层的折射率  $n_2$  的差值,决定了临界角的大小。差值越大,临界角越小,越容易实现全反射。但这个差值也不能太大,光纤通信用的多模光纤,其相对折射率差一般设计为  $\Delta = (n_1 - n_2)/n_1 = 0.01$  左右。

以上的讨论,仅适用于通过光纤轴心平面(称子午面)的那些光线的传播情况。如果光线不通过光纤的轴心平面,则称这些光线为斜射线。这时,光线是呈斜折线或螺旋形式前进的,如图 2-8 所示。

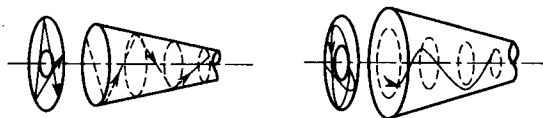


图 2-8 光纤中的斜射线



## 第四节 光纤的光学特性

光纤的光学特性主要用两个参数描述:一个是数值孔径,另一个是剖面(横断面)折射率分布。光纤的剖面折射率分布,用剖面指数  $\alpha$  描述。这两个参数能够充分反映出光纤的光学特性。本节将主要讨论这两个参数的物理意义。

### 一、光纤的数值孔径

数值孔径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,或者说数值孔径是反映光纤捕捉光线(或集光)能力大小的一个参数,如图 2-9 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  $\theta_a$  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  $\theta_a$  的正弦  $\sin \theta_a$  称为光纤的数值孔径,以  $NA$  表示,即

$$NA = \sin \theta_a = n_1 \sqrt{2\Delta} \quad (2-4)$$

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。

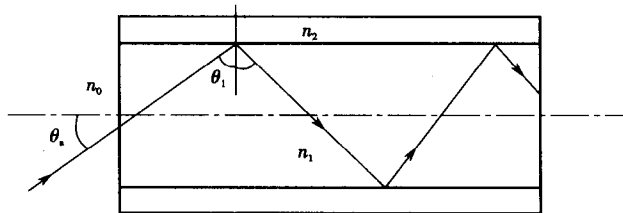


图 2-9 光纤的数值孔径

由式(2-4)可以看出,光纤的数值孔径  $NA$  与其相对折射率差  $\Delta$  有关。 $\Delta$  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,希望其数值孔径值越大越好,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, $\Delta$  值或  $NA$  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  $0.15 \sim 0.24$ ,其允许误差为  $\pm 0.02$ 。我国一般取  $NA = 0.2 \pm 0.02$ 。

### 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  $\alpha$  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。