

光纤通信

现代通信丛书

- 唐棣芳 主编
- 复旦大学出版社



现代通信丛书

光 纤 通 信

唐棣芳 主编

复旦大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

光纤通信/唐棣芳主编. —上海: 复旦大学出版社,
1999. 9

(现代通信丛书)

ISBN 7-309-02354-4

I. 光… II. 唐… III. 光缆通信 IV.
TN929.11

中国版本图书馆 CIP 数据核字(1999)第 38209 号

出版发行 复旦大学出版社
上海市国权路 579 号 200433
86-21-65102941(发行部)86-21-65642892(编辑部)
fupnet@fudanpress.com [http:// www. fudanpress. com](http://www.fudanpress.com)

经销 新华书店上海发行所

印刷 复旦大学印刷厂

开本 787×1092 1/16

印张 8.25

字数 203 千

版次 1999 年 9 月第一版 1999 年 9 月第一次印刷

印数 1—3 500

定价 18.00 元

如有印装质量问题, 请向复旦大学出版社发行部调换。

版权所有 侵权必究

内 容 提 要

DW15/17

本书主要介绍光纤通信的特点、系统的组成、光纤网络的形式、光纤通信的发展方向。

全书分为十七章,分别介绍光纤通信的特点、系统组成、光纤的结构、分类、光在光纤中的传播原理、光纤的衰减和色散特性、光源、发光的基本原理、半导体激光器的特性、光源驱动器、光电探测器、光接收机、光纤系统中应用的自聚焦透镜、光耦合器、光波分复用器和解复用器、光衰减器、光开关、光纤放大器,论述单模光纤通信系统设计原理和局部区域网光纤传输系统、光交换技术、PFM长距离光纤电视传输系统、光通信微波副载波复用系统、光计算机设计思想等。

前 言

从 70 年代发展起来的光纤通信技术,在近 20 年来得到飞速发展,目前已经普遍推广应用。邮电通信、广播电视、公安交通、大型工矿企业、铁路、公路、机场、港口码头、飞机、轮船等各个领域都采用了光纤技术,军事部门包括海军、陆军、空军都十分重视此项技术的应用。这充分显示了光纤技术的生命力,到 2000 年以后,光纤将进入家庭用户。现在,光纤通信已成为现代通信的主要手段之一。

从技术角度看,现在光纤通信系统已全面走向实用化,高次群光纤通信系统、光纤局域网、计算机网、综合业务服务网已经在推广应用。全光通信、光交换技术、全光通信网络、光纤信息处理技术、光计算技术均已在进行研究,有些已进入试验应用。

为适应光纤通信技术的发展,培养更多的光纤通信技术人才是很重要的。本书的目的是为培养人才服务的。

全书内容是根据作者多年从事光纤通信教学、科研的一些实践心得和担任“光纤通信”刊物主编的体会,同时参考了很多资料编写而成的。

书中第十一、十三、十四和十六章主要内容分别由王端骧、陈大华、葛华安、王国忠编写,研究生唐俊华、施文灿、章竺为有关章节提供了材料。在此谨向他们表示衷心感谢。

本书特点是由浅入深、文句通顺、内容丰富。主要适用于大专院校电子工程系、物理系、通信系及有关专业学生的教材,同时可作为从事光纤通信科研和开发的技术人员的参考资料。

在编写本书的过程中曾得到各界朋友和同行的帮助和指导,在此也向他们表示衷心感谢!由于作者水平有限,书中难免存在错误和不妥之处,敬请读者批评指正。

作者

1999 年 7 月

目 录

第一章	概述	1
1.1	光纤通信所用的波长及其优点	1
1.2	光纤通信系统的组成	2
1.3	光纤通信系统的现状	2
第二章	光纤	5
2.1	光纤的结构及材料	5
2.2	光纤的分类	5
2.3	光在光纤中的传播原理	6
2.4	光纤的衰减特性	9
2.5	光纤的色散特性	10
2.6	单模光纤	12
2.7	光缆	15
第三章	光源	18
3.1	引言	18
3.2	发光的基本原理	18
3.3	粒子数反转分布和谐振腔	20
3.4	砷化镓(GaAs)同质结激光器	22
3.5	异质结半导体激光器	24
3.6	半导体激光器的特性	26
3.7	InGaAsP/InP DFB 激光器	28
3.8	发光二极管	29
第四章	光源驱动电路	33
4.1	LED 数字式驱动电路	33
4.2	LD 数字式驱动电路	36
4.3	模拟驱动电路	40
4.4	用光负反馈法实现高频宽带补偿 LD 的非线性	45
4.5	用自适应预失真方法补偿 LD 非线性	46
第五章	光电探测器	49
5.1	概述	49
5.2	光电检测器的物理原理	49
5.3	PIN 光电探测器	50
5.4	雪崩光电二极管	51
5.5	长波长光电探测器	55
5.6	光电探测器与光纤的耦合	56

第六章	光接收机	57
6.1	光接收机的主要性能指标	57
6.2	光接收机的组成	58
6.3	光电检测器的选择	59
6.4	前置放大器的设计	59
6.5	主放大器、均衡器、时钟提取和判别电路	62
6.6	新型光接收机	63
第七章	光纤系统中应用的自聚焦透镜	65
7.1	引言	65
7.2	光在自聚焦透镜中的传播原理	65
第八章	光耦合器	69
8.1	引言	69
8.2	采用自聚焦透镜的光定向耦合器	69
8.3	X型 2×2 定向耦合器	69
8.4	光星形耦合器	70
8.5	光耦合器技术性能指标	72
第九章	光波分复用器和解复用器	74
9.1	引言	74
9.2	光波分复用技术原理简述	74
9.3	光多路波分复用器和解复用器的性能指标	75
9.4	光多路复用器和解复用器的几种结构	75
9.5	光波分复用系统的几种构成形式	76
第十章	光衰减器、光开关	79
10.1	对光衰减器的一般要求	79
10.2	光衰减器类型	79
10.3	光开关	81
第十一章	光纤放大器	83
11.1	引言	83
11.2	光纤放大器原理和结构	83
11.3	掺铒光纤放大器的性能	86
第十二章	单模光纤通信系统设计	88
12.1	单模光纤通信系统的组成	88
12.2	单模光纤通信系统光源选择	88
12.3	单模光纤损耗分析	89
12.4	单模光纤连接器的设计特点	90
12.5	单模光纤系统色散计算	91
12.6	单模光纤系统用的光电检测器	92
12.7	系统增益和光路损耗估算	92
12.8	使用光纤放大器的长途干线光纤通信系统	93

第十三章	局部区域网光纤传输系统	95
13.1	前言	95
13.2	系统设计特点及方框图	95
13.3	系统设计	96
13.4	结论	98
第十四章	采用 PFM 制式的长距离光纤电视传输系统	99
14.1	PFM 的信号与频谱	99
14.2	PFM 光纤传输系统的组成和主要性能	101
第十五章	光通信用微波副载波复用系统	103
15.1	引言	103
15.2	工作原理	103
15.3	光纤 CATV 系统	104
15.4	光纤/同轴电缆混合系统(HFC)	109
第十六章	高维光处理器设计	110
16.1	引言	110
16.2	光处理器硬件基础	110
16.3	余数系统	111
16.4	光处理器系统结构	112
16.5	高维处理器	112
16.6	光处理器控制系统设计	113
第十七章	光交换技术	114
17.1	引言	114
17.2	光交换技术的特点	114
17.3	光交换原理	115
17.4	光交换系统分类和组成	116
17.5	一种光时分制交换时隙分配计算方法	118
参考文献	122

第一章 概 述

光纤通信系统是以光为载波,以光纤为传输介质的通信系统,在光发送端有产生光载波的光源,并将电信号转变为光信号;在光接收端有光电检测器将光信号转变为电信号。在这一章里,我们主要介绍光纤通信的特点、系统的组成、光纤网络的型式,以及光纤通信发展方向。

1.1 光纤通信所用的波长及其优点

光波是人们熟悉的电磁波,其波长在微米级,相对应的频率非常高(约为 $10^{14}\text{Hz}\sim 10^{15}\text{Hz}$),因而它特别适于作宽带信号的载频。目前光纤通信使用的波长范围是在近红外区内,波长为 $0.8\mu\text{m}\sim 1.8\mu\text{m}$,可分为短波长波段和长波长波段,前者中心波长为 $0.85\mu\text{m}$,后者工作波长是 $1.3\mu\text{m}$ 和 $1.55\mu\text{m}$ 。

光纤通信之所以能够飞速发展,是由于它具有以下的突出优点而决定的。

① 由于光波频率很高,可供利用的频带很宽,尤其适合高速宽带信息的传输,在未来的高速通信干线,以及宽带综合服务通信网络中,更能发挥作用。

② 由于光纤的损耗很低(现已做到 0.2dB/km 的量级)。因而可以大大增加通信距离。这对长途干线通信,海底光缆通信十分有利,在采用先进的相干通信技术,光放大技术和光孤子通信技术之后,通信距离可提高到几百公里甚至上千公里。

③ 光纤抗电磁干扰能力很强,这对于电气铁道和高压电力线附近的通信极为有利,也不怕雷击和其他工业设备的电磁干扰,光纤系统也没有发生电火花的安全,因此在一些要求防爆的场合使用光纤通信是十分安全的。

④ 光纤内传播的光能几乎不会向外辐射,因此很难被窃听,也不存在光缆中各根光纤之间信号串扰。

⑤ 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只须采取简单的均衡措施就可以。甚至可以不加均衡措施。

⑥ 光纤是电的绝缘体,因此通信线路的输入端和输出端是电绝缘的,这就没有电位差和接地的问题。同时还有抗核辐射能力。

⑦ 光纤的原材料是石英石,来源十分丰富,可以说是取之不尽。另外光缆重量轻,便于敷设和架设。

1.2 光纤通信系统的组成

光纤通信系统的组成如图 1-1 所示,这是最基本的组成方框图。它包括发送、传输和接收三个部分。加上适当的接口以后,就可作为一个独立的“光线路”插入现有的或新架设的通信系统中,根据传输信号的形式,可以把光纤通信系统分为数字光纤通信系统和模拟光纤通信系统两大类。因为光纤的频带很宽,对传输数字信号十分有利,所以高速率、大容量、长距离的光纤通信系统均为数字光纤通信系统,短距离、小容量的光纤通信系统通常采用模拟光纤通信系统。令人感兴趣的是多路光纤 CATV 系统也是采用模拟制调制方式。

由图 1-1 可以看出:不论是数字光纤通信系统还是模拟光纤通信系统,图中的几个组成部分都是必不可少的,当然,图中光源驱动电路、光源本身、光电检测器和光接收电路均须按具体要求进行设计和选择。

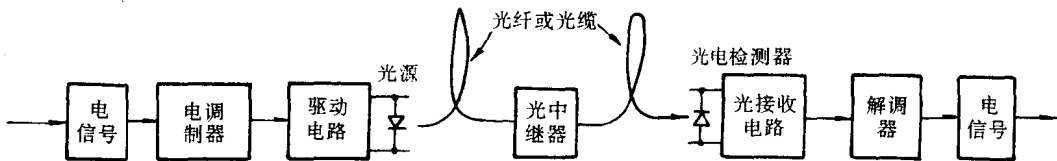


图 1-1 光纤通信系统组成方框图

随着光放大器的研制成功,光中继器已由光放大器所取代,这样既提高了通信距离,又可改善通信质量。

鉴于数字光纤通信已成为光纤通信的主要应用方式,在今后必将得到更广泛的应用。

1.3 光纤通信系统的现状

1. 模拟光纤通信系统的现状

模拟光纤通信系统这里指单路电视传输系统和多路光纤 CATV 传输系统。在 80 年代先开发并推广应用的彩色闭路电视系统和广播电视用光纤传输系统,属于早期的模拟光纤传输系统,到 90 年代初仍然还在用。进入 90 年代,随着光纤技术的深入发展,16 路、32 路、48 路、64 路、128 路的光纤 CATV 系统相继研制成功,并已获得广泛应用。为什么模拟制多路光纤 CATV 系统有其生命力,关键是有了线性度较好、调制带宽很宽的半导体激光器,其次是高频线性补偿电路的研制成功,进一步提高了光源驱动电路的线性。目前在国内外有线电视传输系统中用得甚多。

2. 数字式光纤通信系统的现状

数字式光纤通信系统按用途分为两类:一类是在光纤局域网,例如中速、高速以太网中的应用,传输速率有 10Mb/s、100Mb/s、1Gb/s 三种;另一类是在邮电部门省内干线和长途上用的 PCM 制式的光纤通信,该制式的速率是按群次来区分的,例如一次群,速率是 2.048Mb/s,二次群速率是 8.448Mb/s,三次群速率是 34Mb/s,四次群速率则是 140Mb/s,更高速率的 PCM 系统如五次群、六次群也相继在开发和应用,目前 2.5Gb/s 的 PCM 系统国外已投入应

用,国内正在研制中。

3. 新型光纤通信系统简介

光纤通信技术发展前景十分广阔,以下是举几种新型光纤通信系统。

(1) 长途高速光纤传输系统

新型的长途高速光纤传输系统,其传输速率达到 10Gb/s。它采用单模光纤传输。为实现高速传输和高灵敏度接收,使用大规模集成电路构成高速电路模块,并采用掺铒光纤放大器,使中继距离超过 100km。它为建立越洋洲际的通信系统创造了条件。长途高速光纤传输系统如图 1-2 所示。

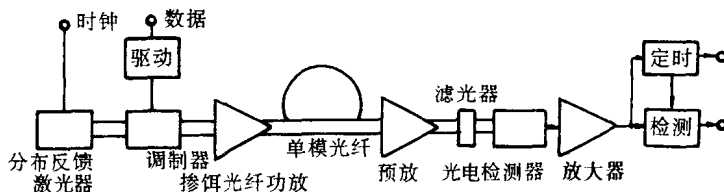


图 1-2 长途高速光纤传输系统示意图

(2) 数字用户网络传输系统

数字用户网络传输系统采用标准 PCM 载波多工技术,将语音信号和数据信号进行各种组合,以 2Mb/s 码流发送到光缆、铜线或用数字微波进行传输,使数字电路自中央局端延伸到用户配线区附近,减少或消除外线设施的配置,提高通信质量及解决缺线问题。系统能与综合业务数字通信网(ISDN)适配,除提供普通电话服务外,在市话网上可提供各种新服务。数字用户网络传输系统如图 1-3 所示。

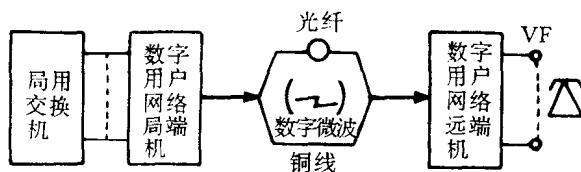


图 1-3 数字用户网络传输系统示意图

(3) 相干光纤通信系统

国外相干光纤通信系统研究进展很快。其最大的优点是接收灵敏度较现用的光强调制、直接检测系统提高 10~100 倍,中继距离长,选择性好,可实现超大容量的光纤通信。相干光纤通信系统如图 1-4 所示。

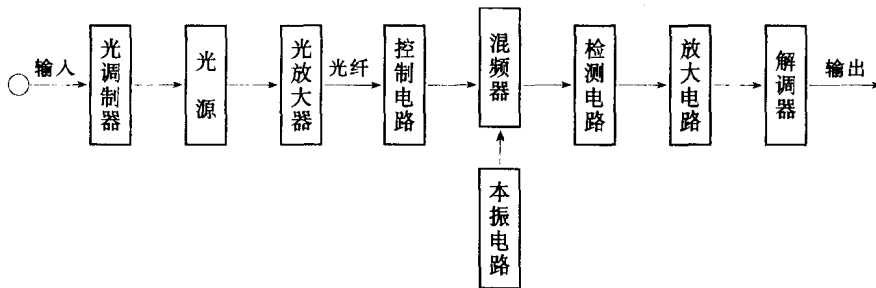


图 1-4 相干光纤通信系统示意图

(4) 全光通信系统

迄今的光通信系统都是光源、光纤、光检测器与大量电子元器件的混合体，传输容量和中继距离受到限制。“全光通信”则可充分利用光纤的传输带宽，真正发挥用“光”传输信息的优势。这种系统可能在本世纪末取得重大突破。全光通信系统如图 1-5 所示。

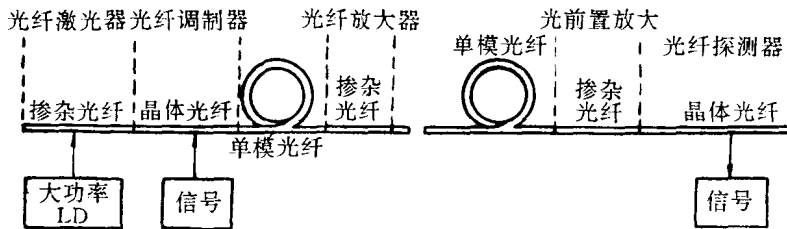


图 1-5 全光通信系统示意图

(5) 光纤网络

光纤局域网已在几年前得到应用，近年来建立信息高速公路已成为热门课题。众所周知，在信息时代，各种信息迅速及时可靠的传送是全社会的迫切要求，因而对光纤网络的功能要求也相应提高了。

现在作为传递信息的主要手段的通信网络越来越完善，正从单一功能的通信网络如电话网、数据网、有线电视网、广播网向功能齐全和统一的综合业务数字网 (ISDN) 发展。作为公用通信网的 ISDN 正从窄带 (N-ISDN) 向宽带 (B-ISDN) 的综合业务数字网方向发展。应该说，这些网的主干线应用光缆来支撑。

各种专用通信网作为公用网的补充，已得到迅速发展。局域网在各个大型企业、事业单位和高层大楼中均已安装或正在安装光纤局域网或其他形式网络。

正在研究的全光通信网络则是当前最热门的研究课题。国外技术先进的国家已进入开发阶段，国内也已列入重点发展项目。

第二章 光 纤

光导纤维(fiber)简称光纤,它的优越性已广为人知,本章将从应用角度简要叙述多模光纤和单模光纤的工作原理。

2.1 光纤的结构及材料

光纤是工作在光频段的一种介质波导。它的形状通常呈圆柱形。其结构一般是由双层的同心圆柱体组成,中心部分称纤芯,一般的多模光纤芯直径为 $50\mu\text{m}$,纤芯以外的部分称为包层,包层直径为 $125\mu\text{m}$,见图 2-1。

纤芯的作用是传导光波,其折射率 $n_1=1.5$ 。包层的作用是将光波封闭在光纤中传播。另外,它能减少由于纤芯表面上的介质不连续性而产生的散射损耗,同时还增加了光纤的机械强度。包层的折射率 $n_2=1.485$ 。因此,纤芯与包层的相对折射率差 $n_1-n_2=0.015$,我们定义两者的相对折射率差 Δ 为

$$\Delta = \frac{n_1 - n_2}{n_1} \quad (2-1)$$

目前实用的光纤材料主要是用 SiO_2 ,即石英材料,在石英中掺入折射率高于石英的掺杂剂,例如 GeO_2 或 P_2O_5 ,就构成纤芯材料,前者称为锗-硅系光纤 $\text{GeO}_2 \cdot \text{SiO}_2$,后者称为磷-硅系光纤 $\text{P}_2\text{O}_5 \cdot \text{SiO}_2$ 。

包层材料是石英中掺入折射率较石英低的掺杂剂,例如 B_2O_3 或氟,即包层材料是 $\text{B}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$ 。

2.2 光纤的分类

改变纤芯材料的成分,可以得到通常使用的两种类型光纤,见图 2-2。

第一种情形,见图 2-2a,纤芯折射率处处是均匀的,而在包层与纤芯交界处,折射率突然变化,由 n_1 变到 n_2 ,这种光纤称为阶跃式折射率光纤(Step Index Fiber)。

第二种情形,见图 2-2b,纤芯轴芯折射率最大,沿半径方向折射率逐渐减小,到了包层与纤芯的界面。 $n_1=n_2$,其分布规律呈抛物线。这种类型的光纤称为梯度式折射率光纤(Graded

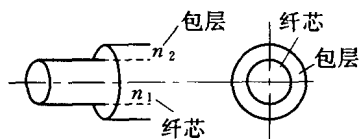


图 2-1 光纤结构示意图

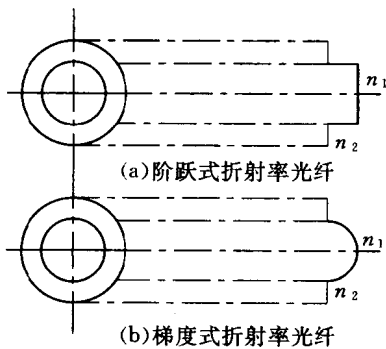


图 2-2 阶跃式光纤和梯度式光纤

Index Fiber)。

从模式来分,可将光纤分为单模光纤与多模光纤。大家都知道,光也是电磁波。电磁波由交变的电场和磁场组成。光在光纤中的传播就是电场和磁场相互交替地变换传播,电场和磁场不同的分布形式就构成不同的模式。

多模光纤,则指能同时传输多种模式的光纤。所谓单模光纤,就是指只能传输单一电磁场模式的光纤。

如果按波长来分,则还可以进一步分为短波长光纤和长波长光纤。前者是指 $0.85\mu\text{m}$ 波长光纤,后者是指 $1.3\mu\text{m}$ (或 $1.55\mu\text{m}$) 波长光纤。

2.3 光在光纤中的传播原理

分析光在光纤中传播的理论一般有两种:射线理论和模式理论。射线理论是把光看作射线。引用几何光学中反射与折射原理解释光在光纤中传播的物理现象。模式理论则把光波当作电磁波,把光纤看作光波导,用电磁场分布的模式来解释光在光纤中的传播现象。这种理论相同于微波波导理论,但光纤属于介质波导,与金属波导管有所区别。模式理论比较复杂,这里不予讨论。下面我们采用射线理论来分析光在光纤中的传播现象。

我们首先分析光在阶跃光纤中传播的情况,图 2-3 是光线在光纤中传播的示意图。首先假定:

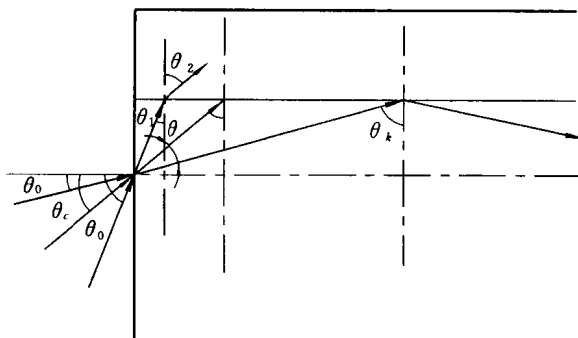


图 2-3 光在阶跃式折射率分布的光纤中的传播轨迹

θ_k : 光在纤芯中全反射传播的临界角。

θ_0 : 光纤端面的光线入射角。

θ : 光线从光纤端面入射到纤芯的折射角。

θ_1 : 光线从纤芯到包层的入射角。

θ_2 : 光线从纤芯到包层的折射角。

θ_c : 光线产生全反射的入射临界角。

1. 光线从空气进入光纤的情况(入射角 θ_0 较大时)

光线以某一角度 θ_0 射入纤维端面中心点上时,如图 2-3 所示。当光线进入光纤纤芯之后,以角度 θ 折射到纤芯与包层的界面(θ 称为折射角,它是进入纤芯端面的折射光线与纤芯

轴线夹角), 设 n_0 为空气折射率($n_0=1$), 则根据斯奈尔定律有

$$n_0 \cdot \sin\theta_0 = n_1 \cdot \sin\theta \quad (2-2)$$

$$\sin\theta_0 = n_1 \cdot \sin\theta \quad (2-3)$$

因为 $n_1 > 1$, 故有 $\theta < \theta_0$

2. 光线从纤芯到包层的界面情况

(1) 一般情况($\theta_0 > \theta_c$, 并假定 θ_c 是产生全反射的入射临界角)

当光线折射入包层界面时, 入射角为 θ_1 (入射光线与界面的法线构成的角), 进入包层后光线的折射角 θ_2 , 则根据斯奈尔定律有

$$n_1 \cdot \sin\theta_1 = n_2 \cdot \sin\theta_2$$

因为 $n_1 > n_2$, 于是有 $\theta_1 < \theta_2$ 。

这种情况下, 光线将大部分进入包层中去。显然在 $\theta_0 > \theta_c$, 即当端面入射角比较大时, 包层与纤芯的界面上的入射角 $\theta_1 < \theta_k$ (已假定 θ_k 为在纤芯中产生全反射传播的临界角), 这时不会产生全反射, 有一部分光泄漏入包层中。

(2) 临界情况

这是一种特殊情况, 如果端面入射角 $\theta_0 = \theta_c$, 包层界面入射角将等于 θ_k , 即 $\theta_1 = \theta_k$, 不满足全反射条件, 但因为此时 $\theta_2 = 90^\circ$, 光将不进入包层, 而在界面掠射, 此时我们称光线从纤芯入射于界面的角 $\theta_1 = \theta_k$ 为临界角, 并且有

$$n_1 \cdot \sin\theta_k = n_2 \cdot \sin\theta_2 = n_2$$

故有

$$\sin\theta_k = \frac{n_2}{n_1} \quad (2-4)$$

(3) 正常情况 $\theta_0 < \theta_c$

光线在纤芯内全内反射, 但只有当 $\theta_1 > \theta_k$ 时, 光线从纤芯入射于纤芯与包层界面, 又从界面返回到纤芯, 此时纤芯与包层的界面好像抛光的金属面一样。

3. 临界端面的入射角及数值孔径

我们总希望光纤传输的光线, 在包层界面发生全反射, 为此必须有人射于纤芯与包层界面的角 $\theta_1 > \theta_k$ (临界角)。在临界情况下, 从几何图上看: $\theta_1 + \theta = 90^\circ$, $\theta = 90^\circ - \theta_1$, 现因 $\theta_1 > \theta_k$, 故有: $\theta = \theta_{\text{全反射}} < 90^\circ - \theta_k$

前面已得到 $\theta < \theta_0$, 这里又有 $\theta < 90^\circ - \theta_k$ (全反射条件), 于是必有一个光线入射端面角 θ_0 为对应 θ_k 的临界入射端面角。

当 $\theta_0 = \theta'_0 < \theta_c$, 则因 $\theta < \theta_0$, θ 较小, 可以满足 $\theta < 90^\circ - \theta_k$ 实现全反射。

当 $\theta_0 = \theta''_0 > \theta_c$, 则因 θ 相应较大, 显然 $\theta_1 < \theta_k$ 。不能实现全反射。

当 $\theta_0 = \theta_c$, 则对应的 θ , 正巧等于 $90^\circ - \theta_k$, 属临界情况。

在临界状态下, 根据斯奈尔定律, 就得到

$$\begin{aligned} n_0 \cdot \sin\theta_0 &= n_0 \cdot \sin\theta_c = n_1 \cdot \sin\theta = n_1 \cdot \sin(90^\circ - \theta_k) \\ &= n_1 \cdot \cos\theta_k \end{aligned}$$

又根据式(2-4), $\sin\theta_c = \frac{n_2}{n_1}$, 于是有

$$\begin{aligned} n_0 \cdot \sin\theta_c &= n_1 \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2} \\ &= \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \\ &\approx n_1 \cdot \sqrt{2\Delta} \end{aligned}$$

定义 $NA = n_0 \cdot \sin\theta_c = n_1 \cdot \sqrt{2\Delta}$ (2-5)

我们常常称 θ_c 为临界角, 又称为接受角, 即接受光的圆锥半角。它的正弦称为数值孔径 NA (Numerical Aperture)。一般希望 NA 愈大愈好, NA 大, 表明光纤端面接受光线进入纤芯的能力强。

数值孔径的数值一般为 0.20~0.25。

下面我们再来讨论渐变折射率光纤的情况。

现在假设纤芯是由许多同轴的均匀层构成, 从里到外, 每一层的折射率越来越小, 中心的折射率为 n_1 最大, 依次为 n_2, n_3, n_4, n_5 , 近包层假定为 n_6 。

$n_1 > n_2 > n_3 > n_4 > n_5 > n_6 > n_7$ 直到纤芯与包层界面, 折射率与包层的折射率相等。

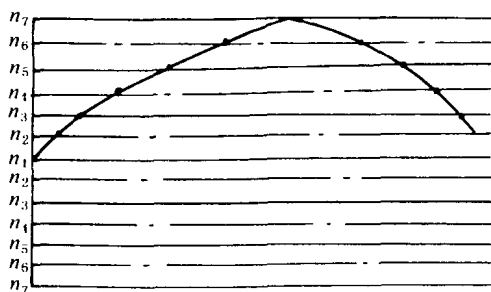


图 2-4 渐变折射率光纤示意图

入射光线在每个高折射率到低折射率的界面上都产生一次折射, 并造成下次入射角更大(或掠射角更小)。经多次折射后, 会在某个界面上达到全反射的临界角, 发生全反射, 光线便回过头来向轴线推进, 经历一个相反的过程回到轴线, 并在轴线的另一侧重复上述过程。当分层无限多时, 光线的轨迹应为光滑曲线。图 2-4 为渐变折射率光纤示意图。

对抛物线型多模光纤, 其子午光线(同轴线相交的光线)虽然可以有許多不同的入射角, 但经历一次全反射后却能重新会聚到一点。情形同阶跃光纤大不相同。这里不同入射角的光线, 相速度相差很大。图 2-5 显示出抛物线型多模光纤中不同模式射线。

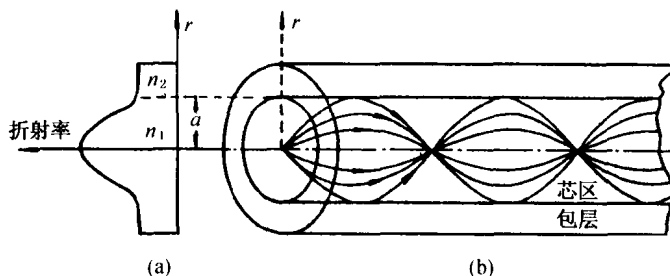


图 2-5 多模渐变折射率光纤中的不同模式射线

从图上看, 传播曲线类似于正弦波, 但不等同。同时看出, 它具有自聚焦性质。

2.4 光纤的衰减特性

衰减是光纤的重要指标,它表明光纤对光能的传输损耗,对光纤通信系统的传输距离有决定性的影响。

衰减系数 α 的定义:

$$\alpha = \frac{10}{L} \log_{10} \frac{P_i}{P_o} \text{ (dB/km)} \quad (2-6)$$

其中:

P_i 、 P_o 分别为光纤的输入、输出光功率。

L 是光纤长度。

产生损耗的原因主要是吸收损耗和散射损耗。

(1) 吸收损耗

吸收损耗是由于光纤材料和其中的不纯物对光能吸收引起的,它们把光能以热能形式消耗于光纤之中。

光纤材料吸收损耗是一种固有损耗,不可避免,我们只能选择固有损耗较小的材料来做光纤。石英在红外波段内吸收较小,是优良的光纤材料。

不纯物的吸收,主要是由于光纤材料中含有 Fe、Co、Ni、Mn 等离子,还有 OH 离子。近代的光纤采用基本上没有金属离子的超纯原料,而光纤的光能损耗主要由于 OH 离子引起,这种吸收颇为严重。

(2) 散射损耗

散射损耗是以光能形式把能量辐射出光纤之外的一种损耗。由于光纤制作工艺上的不完善,例如有微气泡或折射率不均匀以及有内应力,光能在这些地方会发生散射,使光纤损耗增大。

另一种散射损耗是所谓瑞利散射,即光波遇到与波长大小可比拟的带有随机起伏的不均匀质点时发生的散射。瑞利散射损耗与波长四次方成反比,光纤材料分子会引起这种散射损耗,这种损耗是不可避免的。但可以采用较长的工作波长以减少瑞利散射损耗。

光纤中尚存在所谓布里渊散射损耗和拉曼散射损耗,它们是强光在光纤中引起的非线性散射损耗。一般在多模光纤中光能的密度较小,这种情况不会发生。但在单模光纤中,由于芯径小,光能密度足够强,就可能发生这两种损耗。

多模光纤损耗现在的指标大致如下: $0.8\mu\text{m} \sim 0.9\mu\text{m}$ 多模短波长光纤衰减为 $2.5\text{dB/km} \sim 3\text{dB/km}$, $1.3\mu\text{m}$ 多模长波长光纤衰减为 $1\text{dB/km} \sim 1.5\text{dB/km}$ 。单模长波长光纤衰减为 $0.2\text{dB/km} \sim 0.5\text{dB/km}$ 。

现在已有一种叫作双窗口的光纤,即在 $0.85\mu\text{m}$ 和 $1.3\mu\text{m}$ 波长处均有较小的衰减量,前者 $< 3\text{dB/km}$; 后者 $< 1.5\text{dB/km}$ 。

图 2-6 为光纤衰减-波长特性。图 2-7 为无 OH 根低损耗光纤。

由图上看,石英光纤有几个衰减小的窗口。 $\lambda = 0.8\mu\text{m} \sim 0.9\mu\text{m}$ 为短波长窗口,一般用于多模光纤,单模光纤不用。 $\lambda = 1.3\mu\text{m}$ 和 $1.5\mu\text{m}$ 附近有较小的衰减,称为长波长窗口。单模光纤在 $1.55\mu\text{m}$ 处衰减最小,低达 0.16dB/km 。