

光纤通信

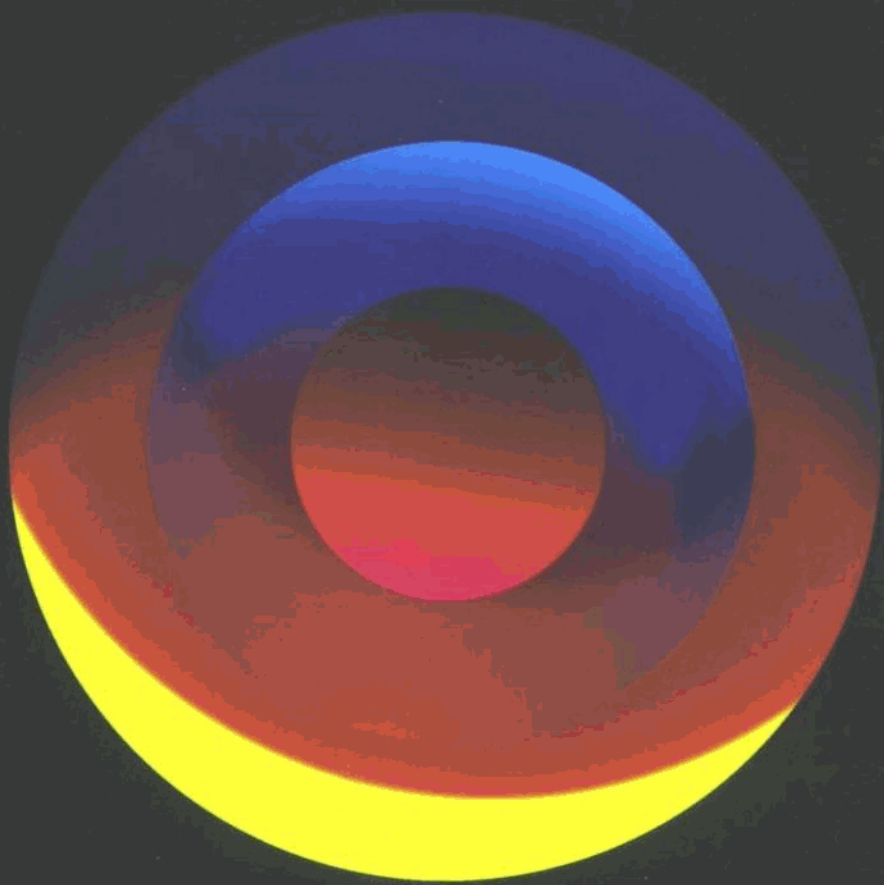
(修订本)



高炜烈

张金

编



电信新技术培训系列教材
DIANXIN XINJISHU PEIXUN
XILIE JIAOCAI

人民邮电出版社

455794

电信新技术培训系列教材

光 纤 通 信

(修订本)

高炜烈 张金菊 编



00455794



人民邮电出版社

内 容 提 要

本书从光纤的结构、种类、特性开始讲起,论述了光纤通信系统中的无源器件,光端机,介绍了光纤通信系统,讲述了掺铒光纤放大器,简明阐述了同步数字体系 SDH,最后还介绍了光纤及光纤通信系统的测量。

本书内容通俗易懂、语言流畅,叙述由浅入深便于读者学习。每章后附有复习思考题,有利于读者自学。

本书可作为电信技术培训班教材,适于电信管理干部学习,也可供电信技术人员参考。

0211/15/13

电信新技术培训系列教材

光纤通信(修订本)

-
- ◆ 编 高伟烈 张金菊
责任编辑 滑 玉
 - ◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市崇文区夕照寺街 14 号
北京朝阳隆昌印刷厂印刷
新华书店总店北京发行所经销
 - ◆ 开本:787×1092 1/16
印张:9
字数:219 千字 1999 年 11 月第 2 版
印数:60 001—65 000 册 1999 年 11 月北京第 6 次印刷

ISBN 7-115-08034-8/TN·1529

定价:16.00 元

修 订 前 言

当前,电信新业务、新技术迅速发展,广大干部和职工急需提高业务、技术和管理水平,以适应通信大发展的需要。1992年11月以来,我社已陆续出版了《移动通信》、《电信新业务》、《电信增值业务》、《电信网》、《Internet 原理与应用》、《异步转送模式》等“电信新技术培训系列教材”共45种。

这套书具有技术新、内容精、理论联系实际,以及适合短期培训和自学使用等特点,受到了广大读者的欢迎。对于进一步提高各类电信管理人员的素质和管理水平,促进业务发展、技术更新,增强网络运行效率,收到了较好的效果。但随着电信事业的进一步发展,这套书中有些讲述的技术业务已趋于落后,有必要进行修订。为此,我们根据广大电信职工和管理干部的反映,结合企业实际工作的需要,对于《光纤通信》、《数字通信》、《7号信令系统》、《电信网》等一批教材进行修订,并陆续出版。

由于时间仓促,经验不足,书中难免有缺点和不足之处,希望各地在使用过程中,及时把意见反馈给我们,以便今后改正。

目 录

第一章 概述

1.1 光纤通信的发展简介	1
1.2 光纤通信的特点	2
1.3 光纤通信的基本组成	2
1.4 光纤通信的发展动向	3

第二章 光纤和光缆

2.1 光纤的结构和分类	4
2.2 用射线法分析光波在光纤中的传输	6
2.3 用波动理论简要分析阶跃型光纤中的导波	16
2.4 单模光纤	20
2.5 光纤的损耗特性及色散特性	23
2.6 光纤的温度特性和机械特性	27
2.7 几种特殊的光纤	29
2.8 光缆的结构和种类	31
复习思考题	36

第三章 光路无源器件

3.1 光纤连接器	37
3.2 光定向耦合器	38
3.3 光衰减器	39
3.4 光隔离器	40
复习思考题	41

第四章 光端机

4.1 与激光器有关的几个概念	42
4.2 激光器的一般工作原理	45
4.3 半导体激光器(LD)	48
4.4 半导体发光二极管(LED)	54
4.5 光源的调制	55
4.6 光发射机	57

4.7 光纤通信中的码型	60
4.8 光电检测器	64
4.9 光纤数字接收机	69
4.10 光接收机的主要指标	76
4.11 光接收机的噪声	77
复习思考题	78
第五章 光纤通信系统	
5.1 强度调制直接检波光纤通信系统的组成	79
5.2 光纤通信系统设计	84
5.3 光纤通信中的复用系统	92
5.4 光纤通信多终端网络系统	96
5.5 外差光纤通信系统	99
5.6 光纤的非线性效应和光孤立于通信	101
复习思考题	103
第六章 光放大器	
6.1 光放大器的分类	104
6.2 掺铒光纤放大器的结构	105
6.3 掺铒光纤放大器的工作原理	106
6.4 掺铒光纤放大器的特性指标	107
6.5 掺铒光纤放大器在光纤通信系统中的应用	108
复习思考题	109
第七章 同步数字体系 SDH	
7.1 同步数字体系的产生	110
7.2 SDH 的速率与帧结构	112
7.3 SDH 的复用结构和映射方法	114
7.4 SDH 中的关键设备——复用设备和交叉连接设备	120
7.5 SDH 的自愈网	123
复习思考题	124
第八章 光纤及光纤通信系统的测量	
8.1 光纤参数的测量	126
8.2 光纤通信系统的测量	133
复习思考题	135
参考书目	136

第一章 概 述

光纤即为光导纤维的简称。

光纤通信是以光波为载波,以光导纤维为传输媒质的一种通信方式。

由于光纤通信具有一系列优异的特性,因此,光纤通信技术近年来发展速度之快,应用面之广是通信史上罕见的。可以说这种新兴技术,是世界新技术革命的重要标志,又是未来信息社会中各种信息网的主要传输工具。

为了使读者在深入学习之前对光纤通信有一基本了解,在本章中先对光纤通信作一概括介绍。

1.1 光纤通信的发展简介

光波是人们最熟悉的电磁波,其波长在微米级、频率为 $10^{12} \sim 10^{16}$ Hz 数量级、由图 1-1 电磁波谱中可以看出,紫外线、可见光、红外线均属于光波的范畴。目前光纤通信使用的波长范围是在近红外区内,即波长为 $0.8 \sim 1.8 \mu\text{m}$,可分为短波长波段和长波长波段。短波长波段是指波长为 $0.85 \mu\text{m}$,长波长波段是指 $1.31 \mu\text{m}$ 和 $1.55 \mu\text{m}$,这是目前所采用的三个通信窗口。

利用光导纤维作为光的传输介质的光纤通信其发展只有二三十年的历史,它的发展是以 1960 年美国 Maiman 发明的红宝石激光器和 1966 年英籍华人高锟(C·K·Kao)博士提出利用 SiO_2 石英玻璃可制成低损耗光纤的设想为基础的,这种设想到 1970 年美国康宁公司研制出损耗为 20dB/km 的光纤,才使光纤进行远距离传输成为可能。自此以后,光纤通信的研究在世界范围内展开并得到迅猛发展。

光纤通信系统的发展,可分为几代进程:

第一代光纤通信系统,是以 1973 ~ 1976 年的 $0.85 \mu\text{m}$ 多模光纤通信系统为代表,传输速率为几十 Mbit/s,中继距离约 10km 左右;第二代光纤通信系统,是 70 年代末、80 年代初的多模和单模光纤通信系统,工作波长为 $1.31 \mu\text{m}$,传输速率是 140Mbit/s,中继距离约 20 ~ 50km;第三代光纤通信系统是 80 年代中期以后的长波长单模光纤通信系统,其工作波长为 $1.3 \mu\text{m}$,传输距离约 50km;第四代光纤通信系统,是指进入 90 年代以后的同步数字体系(SDH)光纤传输网络,传输速率可达 2.5Gbit/s,中继距离为 80km 左右,在此传输网络中,开始采用光纤放大器(EDFA)以及光波复用技术。随着信息时代对通信的要求,在光纤通信领域中,一些更先进的光纤通信系统如:相干光通信系统、光孤子通信系统等将逐步走向实用。

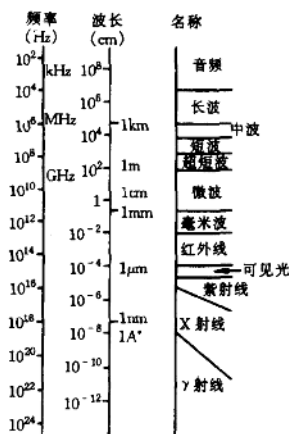


图 1-1 电磁波谱

1.2 光纤通信的特点

光纤通信与电通信方式的主要差异有两点:一是用光频作为载频传输信号,二是用光导纤维构成的光缆作为传输线路。因此,在光纤通信中起主导作用的是产生光波的激光器和传输光波的光导纤维。

半导体激光器的发光面积很小,它输出稳定而且方向性极好的激光,激光可以运载巨大的信息量。

光纤是一种介质光波导,具有把光封闭在其中并沿轴向进行传播的导波结构。它是由直径大约只有 0.1mm 的细玻璃丝构成。

光纤通信之所以能够飞速发展,是由它具有的以下突出优点而决定的。

(1) 传输频带宽,通信容量大

由信息理论知道,载波频率越高通信容量越大,因目前使用的光波频率比微波频率高 $10^4 \sim 10^5$ 倍,所以通信容量约可增加 $10^4 \sim 10^5$ 倍。

(2) 损耗低

目前使用的光纤均为 SiO_2 (石英)系光纤,要减小光纤损耗,主要是靠提高玻璃纤维的纯度来达到,由于目前制成的 SiO_2 玻璃介质的纯净度极高,所以光纤的损耗极低,在光波长 $\lambda = 1.55\mu\text{m}$ 附近,衰耗有最低点,可低至 0.2dB/km,已接近理论极限值。

由于光纤的损耗低,因此,中继距离可以很长,在通信线路中可以减少中继站的数量,降低成本且提高了通信质量。

(3) 不受电磁干扰

因为光纤是非金属的介质材料,因此,它不受电磁干扰。

(4) 线径细、重量轻

由于光纤的直径很小,只有 0.1mm 左右,因此制成光缆后,直径要比电缆细,而且重量也轻。这样在长途干线或市内干线上,空间利用率高,而且便于制造多芯光缆。

(5) 资源丰富

光纤通信除上述主要优点之外,还有抗化学腐蚀等特点。

当然,光纤本身也有缺点,如光纤质地脆、机械强度低;要求比较好的切断、连接技术;分路、耦合比较麻烦等。但这些问题随着技术的不断发展,都是可以克服的。

1.3 光纤通信的基本组成

目前使用的光纤通信系统,普遍采用的是数字编码、强度调制——直接检波通信系统。这种系统的示意方框图如图 1-2 所示。

强度这里即光强,指单位面积上的光功率。所谓强度调制,是用信号去直接调制光源的光强,使之随信号电流呈线性变化;直接检波是指信号直接在接收机的光频上检测为电信号。

图中电端机就是通常的 PCM 多路复用设备,光发送端机是将电信号变换成光信号的光发射机,采用的光源是半导体激光器(LD)或半导体发光二极管(LED)。它们都是通过加正向偏

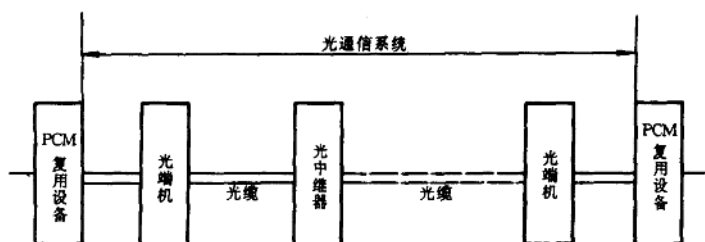


图 1-2 光纤通信传输系统的基本构成

置电流而使其发光的半导体二极管,但 LD 发出的是激光,而 LED 发出的是荧光。

光发送端机将已调制的光波送入光导纤维,经光导纤维传送至光接收端机。

光接收端机是将光信号变换成电信号的光接收机。光信号经过光纤传输到达接收端,首先经光电二极管(PIN)或雪崩光电二极管(APD)检波变为电脉冲,然后经放大,均衡,判决等适当处理,恢复成送入发送端时的电信号,再送至接收电端机。

从光纤通信系统的构成图中,可将系统分为几个大部分来介绍。第一部分为光传输部分,包括光纤和光缆,在教材的第二章中介绍;第二部分为光发送部分,包括光纤通信中的半导体光源和光发送端机,在教材的第四章中介绍;第三部分为光接收部分,包括光纤通信中的半导体光电检测器和光接收端机,也教材的第四章中介绍;以上三个部分连接起来,即为教材第五章介绍的光纤通信系统。

1.4 光纤通信的发展动向

光纤通信以它独特的优点被认为是通信史上一次革命性的变革,光纤通信网将在长途通信网与市话通信网中代替电缆通信网,这已为世界各国所公认。

今后光纤通信的发展趋势,将沿着扩大通信容量,延长中继距离的主方向发展。扩大通信容量将采用光复用技术,如光波分复用系统、副载波复用系统;延长中继距离可采用全光通信系统以至更新的光孤子通信系统。

由于目前实用光纤在 $1.55\mu\text{m}$ 波长其损耗值已接近 SiO_2 光纤的理论极限值,要想进一步降低损耗,必须选用合适的光纤材料,因此氟化物光纤的研制得到普遍重视,在光波长超过 $2\mu\text{m}$ 时,其损耗值可降到 0.001dB/km , 中继距离可延至上千 km。

光纤放大器是实现全光传输的关键,即用全光中继代替光/电/光转换形式中继器,它促进和推动了光纤通信领域中多项新技术的发展,使光纤通信的整体水平提高。目前世界上许多国家对掺铒光纤放大器进行了实验,美国 AT&T、Bell 实验室利用掺铒光纤放大器成功地实现了 5Gbit/s 和 2.4Gbit/s 的传输实验,传输距离分别为 9000km 和 21000km , 现已使用。

随着信息社会的发展,需要传输和交换的信息量越来越大,要求交换的信息种类越来越多,为了在世界范围内统一管理,将各种通信业务都变为数字信号,综合到一个网中,即宽带综合业务数字网(B-ISDN),而且开始建设和应用同步数字体系(SDH)光纤传输网络,传输速率达 2.5Gbit/s , 无中继距离约 80km , 同步光纤传输网为实现 B-ISDN 提供了技术上的可能性。

第二章 光纤和光缆

光纤是传输信息的主要介质,因此研究光纤通信,首先应对光纤的结构与分类、光纤的导光原理以及光纤的有关特性有所了解。另外,由于在实际的光纤通信线路中,为了保证光纤能在各种敷设条件下和各种环境中长期使用等原因,就必须将光纤构成光缆,这样对光缆也需有一定的了解。以上这些即是本章将要阐述的主要内容。

2.1 光纤的结构和分类

2.1.1 光纤的结构

目前通信用的光纤是用石英玻璃(SiO_2)制成的横截面很小的双层同心圆柱体。未经涂覆和套塑时称为裸光纤,其示意图如图 2-1 所示。它由纤芯和包层组成,折射率高的中心部分叫做纤芯,其折射率为 n_1 ,直径为 $2a$;折射率低的外围部分称为包层,其折射率为 n_2 ,直径为 $2b$ 。

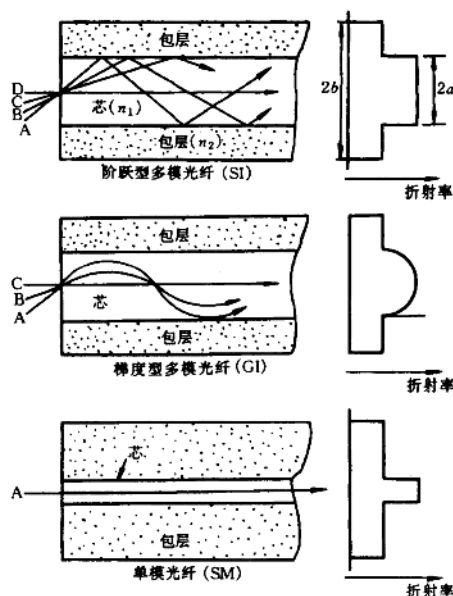


图 2-1 裸光纤结构示意图

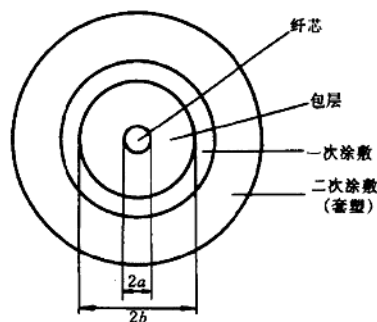


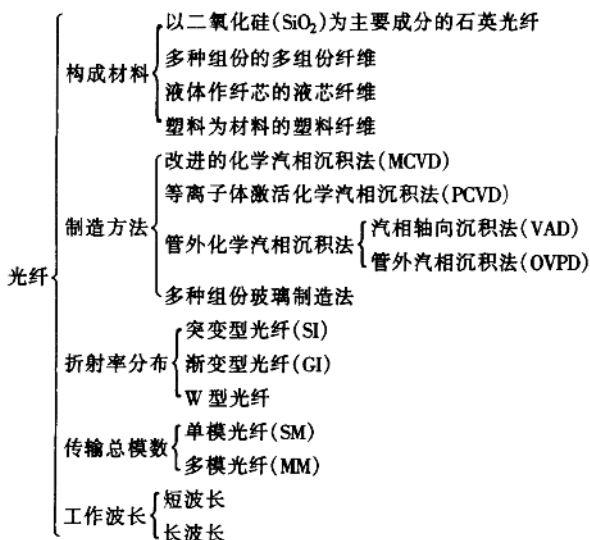
图 2-2 光纤芯线的剖面构造

由于石英玻璃质地脆、易断裂,为了保护光纤表面,提高抗拉强度以及便于实用,一般需在裸光纤外面进行两次涂覆而构成光纤芯线,如图 2-2 所示。光纤芯线是由纤芯、包层、涂覆层

及套塑 4 部分组成。包层的外面涂覆一层很薄的涂覆层,涂覆材料为硅酮树脂或聚氨基甲酸乙脂,涂覆层的外面套塑(或称二次涂覆),套塑的原料大都采用尼龙、聚乙烯或聚丙烯等塑料。

2.1.2 光纤的种类

光纤可以根据构成光纤的材料成分、光纤的制造方法、光纤的传输总模数、光纤横截面上的折射率分布和工作波长进行如下所示的分类。



一、按照折射率分布不同来分

通常采用的是阶跃型光纤和渐变型光纤两种。

1. 阶跃型光纤

光纤纤芯的折射率 n_1 和包层的折射率 n_2 都为常数,且 $n_1 > n_2$,在纤芯和包层的交界面处折射率呈阶梯型变化,这种光纤称为阶跃型光纤,又称为突变型光纤,可用 SI 表示。结构如图 2-3(a)所示。

2. 渐变型光纤

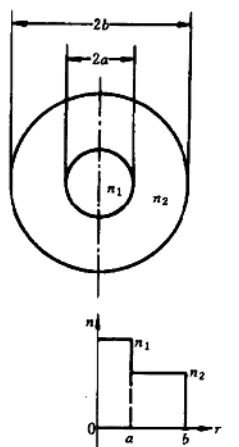
光纤纤芯折射率 n_1 随着半径的增加而按一定规律减小,到纤芯与包层交界处为包层的折射率 n_2 ,即纤芯中折射率的变化呈近似抛物线型。这种光纤称为渐变型光纤,可用 GI 表示。结构如图 2-3(b)所示。

二、按照传输的总模数来分

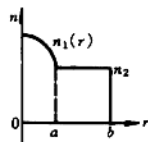
所谓模式,实质上是电磁场的一种分布形式。模式不同,其分布不同,根据光纤中传输模式数量来分,可分为单模光纤和多模光纤。

1. 单模光纤(SM-Single mode fiber)

单模光纤的纤芯直径很小,约为 $4 \sim 10\mu\text{m}$,理论上只传输一



(a)阶跃型光纤的剖面折射率分布



(b)渐变型光纤的剖面折射率分布

图 2-3 光纤的剖面折射率分布

种模式。

由于单模光纤只传输主模,从而完全避免了模式色散,使得这种光纤的传输频带很宽,传输容量很大,适用于大容量、长距离的光纤通信。

单模光纤是当前研究和应用的重点,也是光纤通信与光波技术的发展必然趋势。这种光纤中的光射线轨迹如图 2-4(a)所示。

2. 多模光纤(MM-Multi mode fiber)

在一定的工作波长下,当有多个模式在光纤中传输时,则这种光纤称为多模光纤。多模光纤剖面折射率的分布,有均匀的和非均匀的,前者称为多模阶跃型光纤,后者称为多模渐变型光纤,其光射线轨迹如图 2-4(b)、(c)所示。

多模阶跃型光纤的纤芯直径一般为 $50 \sim 75\mu\text{m}$,包层直径为 $100 \sim 200\mu\text{m}$,由于其纤芯直径较大,传输模式较多。这种光纤的传输性能较差,带宽比较窄,传输容量也比较小。

多模渐变型光纤纤芯直径一般也为 $50 \sim 75\mu\text{m}$,这种光纤频带较宽,容量较大,是 80 年代初采用较多的一种光纤型式。所以一般多模光纤指的是这种多模渐变型光纤。

由于光纤制造技术的不断进步,单模光纤具有显著的优越性,而成本又与多模光纤相当,所以目前单模光纤得到了广泛应用。

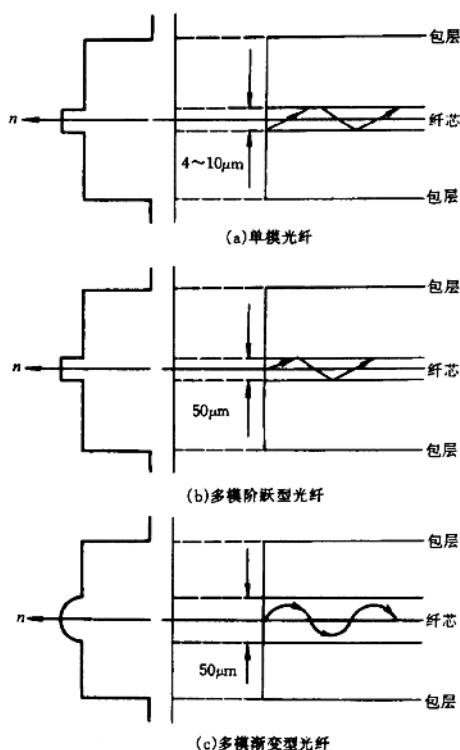


图 2-4 光纤中的光射线轨迹

2.2 用射线法分析光波在光纤中的传输

当媒质的几何尺寸远大于光波波长时,光可以用一条表示光的传播方向的几何线来代表,这条几何线就称为光射线。用光射线来研究光传播特性的方法,称为射线法。

这一节将采用射线法分析光波传输的基本规律,并对光纤中的导光机理进行简单分析。

2.2.1 均匀平面波的一般概念

所谓均匀平面波,就是指在与传播方向垂直的无限大平面的每个点上,电场强度 $\vec{E}$ 的幅度相等、相位及方向相同;磁场强度 $\vec{H}$ 的幅度也相等、相位及方向也相同。用直角坐标系把以上含义画出来,即如图 2-5 所示。

如果均匀平面波是在均匀理想介质中传播,其特性可概括为以下几点:

(1) 平面波的电场、磁场互相垂直,都位于与传播方向垂直的平面上而无纵向分量,因此

称它为横电磁波(TEM波);

(2) 均匀平面波在同一等相位面上电场的幅度相等;磁场的幅度也相等;

(3) 平面波的传播方向垂直于电磁场所在的平面,传播速度为 $V = \frac{1}{\sqrt{\mu\epsilon}}$ 。如果平面波是在折射指数为 n 的无限大的介质中传播,其传播速度为 $V = \frac{c}{n}$;如果是在空气中传播,由于真空中的折射指数 $n_0 = 1$,则其传播速度即为光速 $V = C = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$ 。

(4) 均匀平面波在某一种无限大的介质中传播时,在单位长度上相位变化了多少,用相位常数 k 来表示。

从电磁场理论中得知

$$k = \frac{\omega}{V}$$

而

$$V = \frac{c}{n}$$

则

$$k = \frac{\omega n}{c}$$

式中

$$\omega = 2\pi f, \quad c = f \cdot \lambda_0$$

因此

$$k = \frac{2\pi}{\lambda_0} \cdot n$$

如令 $k_0 = \frac{2\pi}{\lambda_0}$ 为平面波在真空中的相位常数,则平面波在某一种介质中的相位常数,应为真空中的相位常数与这种介质折射指数的乘积。为

$$k = k_0 n \quad (2-1)$$

(5) 由于理想介质没有损耗,因此在传播中,电场强度和磁场强度的幅度不随距离 Z 而变化。

2.2.2 光波在两介质交界面的反射和折射

如前所述,光波属于电磁波的范畴,在均匀介质中传播时,其轨迹是一条直线,可称为光线。当光线射到两种介质交界面时,将发生反射和折射。

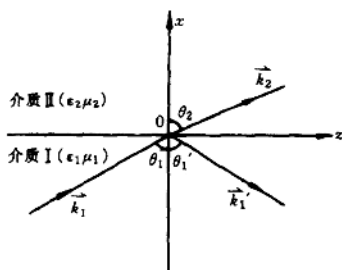


图 2-6 平面波的反射和折射

如图 2-6 所示,有两个半无限大介质,其介质参数分别为 ϵ_1, μ_1 和 ϵ_2, μ_2 , $x=0$ 的平面为两介质的交界面, x 轴为界面的法线。

光线 k_1 方向由介质 I 投射到界面上,这时将发生反射和折射,一部分光波沿 k'_1 方向返回介质 I,称为反射波;一部分光波将沿 k_2 方向进入到介质 II,称为折射波。图中 k_1, k'_1, k_2 表示了入射线、反射线、折射线传输方向,它们和法线之间的夹角分别为入射角、反射角、折射角,用 θ_1, θ'_1 和 θ_2 表示。

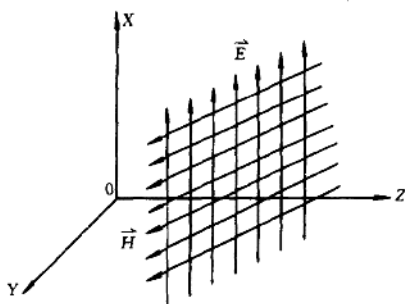


图 2-5 沿正 Z 轴传播的均匀平面波

由电磁场理论知道,反射和折射的基本规律是由斯涅尔定律和菲涅尔公式表示。

一、斯涅尔定律

斯涅尔定律说明反射波、折射波和入射波方向之间的关系。包括以下两个关系式:

$$\theta_1 = \theta'_1 \quad (2-2)$$

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \quad (2-3)$$

其中,式(2-2)称为反射定律,式(2-3)称为折射定律。

折射定律式中的 n 代表介质的折射指数。其物理概念是:光波在不同介质中传播时,其速度不同,在真空中的传播速度最快,而在其它介质中传播的速度要比在真空中慢。光在真空中传播的速度与在介质中传播的速度之比,定义为介质的折射指数(或称折射率),用 n 表示。

$$n = \frac{c}{V} \quad (2-4)$$

斯涅尔定律中的反射定律确定了反射角和入射角的关系;折射定律确定了折射角和入射角之间的关系。这是两个十分重要的定律,分析光射线在介质光波导中的传输特性时,将应用反射定律和折射定律的概念。

二、菲涅尔公式

菲涅尔公式表明反射波、折射波与入射波的复数振幅之间的关系。由三者的复数振幅之间关系,可引出两个重要参量:反射系数 R 和折射系数 T 。

设 E_{01} 、 E'_{01} 、 E_{02} 为入射波、反射波和折射波的复数振幅,则

$$R = \frac{E'_{01}}{E_{01}} = |R| e^{j2\phi_1} \quad (2-5)$$

$$T = \frac{E_{02}}{E_{01}} = |T| e^{j2\phi_2} \quad (2-6)$$

从式中看出, R 和 T 都是复数,包括大小和相位。式中 $|R|$ 、 $|T|$ 是反射系数和折射系数的模,分别表示反射波、折射波和入射波的大小之比; $2\phi_1$ 和 $2\phi_2$ 是反射系数与折射系数的相角,分别表示在界面上由于反射或折射,使反射波、折射波比入射波超前的相位。

为了分析问题方便,常将平面波分成水平极化波和垂直极化波来讨论。电场矢量与分界面平行的平面波叫做水平极化波;磁场矢量和分界面平行的平面波叫做垂直极化波。它们的入射波、反射波和折射波的极化方向如图 2-7 所示。

根据折射定律,可用入射角 θ_1 表示折射角 θ_2 ,为

$$\begin{aligned} \cos \theta_2 &= \pm \sqrt{1 - \sin^2 \theta_2} \\ &= \pm \sqrt{1 - \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2 \sin^2 \theta_1} \end{aligned} \quad (2-7)$$

由以上式子可以看出,它们都是由介质参数 n_1 、 n_2 及入射角 θ_1 而决定的。

2.2.3 光波的全反射

一、全反射的概念

全反射在光波传输问题中是一个重要的物理现象。

从图 2-6 中可看出,当光射线由折射指数大的介质 I (如 n_1) 射向折射指数较小的介质

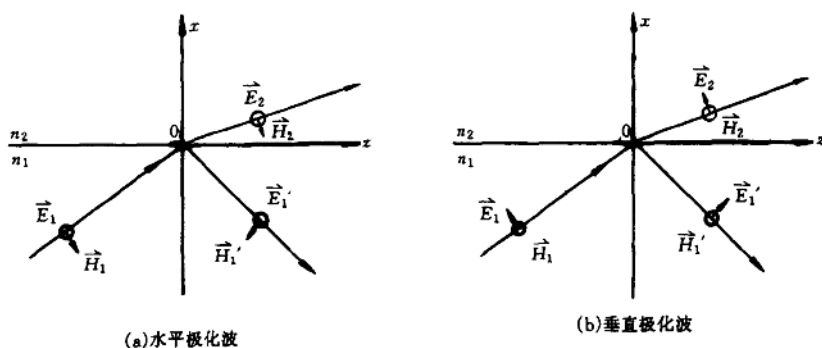


图 2-7 水平极化波与垂直极化波的反射和折射

II (如 n_2) 时, 由于 $n_1 > n_2$, 则由式(2-2)可判断出此时介质 II 中的折射线将离开法线而折射, 即折射角 θ_2 必大于入射角 θ_1 , 当入射角增加到某一值时, 可使得折射角 $\theta_2 = 90^\circ$, 这时折射线将沿界面传输, 我们把此时的入射角称为临界角, 用 θ_c 表示。根据折射定律

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

当 $\theta_2 = 90^\circ$ 时, $\theta_1 = \theta_c$, 则

$$\sin \theta_c = \frac{n_2}{n_1} \quad (2-8)$$

这时如果再继续增大入射角, 即 $\theta_1 > \theta_c$, 则折射角 θ_2 必大于 90° , 光射线不再进入介质 II, 而由界面全部反射回介质 I, 这种现象称为全反射。经过理论分析, 此时反射系数的模值等于 1。

由此可得出全反射的条件是: $n_1 > n_2$; $90^\circ > \theta_1 > \theta_c$, 阶跃型光纤就是利用光波的全反射原理, 将光波限制在纤芯中向前传播。

二、导行波

由前面的概念我们得知, 当入射波投射到两种介质分界面时, 将产生反射波和折射波, 但实际上这两个波是一个统一体, 是一个波型的两部分。

下面将以水平极化波为例来说明在全反射情况下, 介质 I 和介质 II 中波的传播情况, 以此引出导行波的概念。

1. 全反射时, 介质 I 中的波

由图 2-7(a) 中可以看出, 在介质 I 中既有入射波、又有反射波, 因此合成波应是二者的叠加, 而且在全反射情况下, 入射波和反射波的复数振幅值相等。由此可得出(数学推导过程从略):

$$E = E_1 + E'_1 = 2E_{01} \cos(k_{1x}x + \varphi_1) e^{-j(k_{1z}z - \omega t)} \quad (2-9)$$

式中 $E_1 = E_{01} e^{-j\vec{k}_1 \cdot \vec{r}}$ 为入射波电场强度

$E'_1 = E_{01} e^{-j\vec{k}'_1 \cdot \vec{r}}$ 为反射波电场强度

其中: $\vec{k}_1$ 为入射波的波矢量; $\vec{k}'_1$ 为反射波的波矢量; $\vec{r}$ 为矢径, 代表某点的位置矢量; E_{01} 为入射波或反射波的复数振幅; k_{1x} 为入射波的波矢量在 x 方向的分量, 为 $k_{1x} = k_1 \cos \theta_1$

由式(2-1)可知, $k_1 = k_0 n_1$,

则

$$k_{1x} = k_0 n_1 \cos \theta_1$$

k_{1x} 为入射波的波矢量在 Z 方向的分量, 为 $k_{1x} = k_1 \sin \theta_1 = k_0 n_1 \sin \theta_1$ 。

入射波、反射波、折射波的波矢量沿坐标轴方向的分量, 见图 2-8 所示。

从式(2-9)中可看出, 此式共包含两部分:

第一部分为: $2E_{01} \cos(k_{1x}x + \varphi_1)$ 这是合成波的幅度成分, 说明介质 I 中合成波的幅度沿 X 方向按三角函数规律变化, 是振荡型的, 即呈驻波分布;

第二部分为: $e^{-j(k_{1x} \cdot z - \varphi_1)}$ 是合成波的相位成分, 可看出合成波的相位随 Z 的增加而滞后, 表示合成波是沿 Z 方向传输的, 即呈行波分布。

综上所述可得出结论: 在全反射情况下, 介质 I 中的波沿 X 方向呈驻波分布, 沿 Z 方向呈行波分布, 即波是沿 Z 方向传播的。

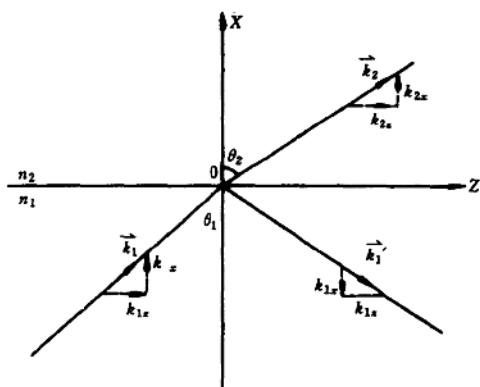


图 2-8 波矢量的分量

2. 全反射时, 介质 II 中的波

在介质 II 中只有折射波 E_2 , 则根据图 2-8 并经过推导, 得出

$$\begin{aligned} E_2 &= E_{02} e^{-jk_2 z} \\ &= E_{02} e^{-\alpha x} e^{-j(k_{2x} \cdot z - \varphi_1)} \\ &= E_{01} |T| e^{-\alpha x} e^{-j(k_{2x} \cdot z - \varphi_1)} \end{aligned} \quad (2-10)$$

式中:

k_{2x} 为折射波的波矢量在 Z 方向的分量为, $k_{2x} = k_2 \sin \theta_2 = k_0 n_2 \sin \theta_2$, 根据折射定律, 可得出 $k_{2x} = k_0 n_1 \sin \theta_1$;

E_{02} 为折射波的复数振幅, $E_{02} = E_{01} |T|$, 其中 $|T|$ 是折射系数的模值;

α 为 X 方向的衰减常数, $\alpha = k_0 n_1 \sqrt{\sin^2 \theta_1 - (\frac{n_2}{n_1})^2}$

式(2-10)共包含两部分:

第一部分: $e^{-\alpha x}$ 是描述幅度情况的因子, 说明介质 II 中波的幅度随离开界面的距离 X 而呈指数式的衰减, 衰减速度决定于沿 X 方向的衰减常数 α ;

第二部分: $e^{-j(k_{2x} \cdot z - \varphi_1)}$ 是波的相位成分, 它与介质 I 中合成波的相位成分形式相同, 由前面分析而知, 其中

$$k_{2z} = k_0 n_1 \sin \theta_1 = k_{1z}$$

这个结果恰好说明介质Ⅰ中的波和介质Ⅱ中的波的相位常数相同,表示它们沿 Z 方向以同样的相位常数在传输,因此是一个波型的两部分。

3. 导行波的概念

由以上分析,可得出结论:在全反射情况下,介质Ⅰ和介质Ⅱ中的波,沿 Z 方向,它们都是以同样的相位常数在传播;沿 X 方向,介质Ⅰ中合成波的幅度按三角规律变化,呈驻波分布,而介质Ⅱ中的波,是按指数规律衰减, X 方向的衰减常数 α 越大,衰减越快,当 α 足够大时,介质Ⅱ中的波将只存在于介质Ⅰ表面的附近,所以称为表面波,而这种表面波是沿 Z 方向传播的,即是与界面平行的方向传播的,这就是说,电磁波被介质边界所导行,因而叫导行波,简称为导波。

导波在光纤通信中是重点研究的波型,因为各种光波导的传导波都属于这一类。

2.2.4 光纤中光射线的分析

在这个问题里,主要讨论阶跃型光纤、渐变型光纤的导光机理。

如前所述,分析光纤的导光原理主要有两种:一是波动理论法,一是射线法。波动理论法是将光波按电磁场理论,用麦氏方程去求解,根据解答式分析其传输特性;射线法是将光波看成是一条条几何射线,用光射线理论分析光纤的传输特性。后者比较直观。下面将采用射线法分析阶跃型光纤和渐变型光纤。

一、阶跃型光纤中光射线的分析

所谓阶跃型光纤,即是指纤芯中的折射率分布是均匀的,是一个不随半径而变化的常数。如设纤芯中的折射率为 n_1 ,包层的折射率为 n_2 ,为了能出现全反射,要求 $n_1 > n_2$ 。

1. 阶跃型光纤中的光射线

在光纤中可存在如下不同形式的光射线:子午线和斜射线。

(1) 子午线

如图2-9(a)所示,过纤芯的轴线 OO' 可做很多平面,这些平面称为子午面。子午面上和轴线相交的光射线,就称为子午射线,简称为子午线。

从图中可以看出,子午线在纤芯与包层的交界面上来回全反射而形成锯齿形波,被限制在光纤纤芯中,它是一条与光纤轴线相交的平面折线,在端面上的投影是一条直线。

(2) 斜射线

图2-9(b)画出了光纤中的斜射线,这种射线不在一个平面里,是不经过光纤轴线的空间折线。

从它在光纤端面上的投影中可以看出,这种射线在纤芯中亦是按照反射定律而形成全反射。斜射线的情况比较复杂,下面只对阶跃型光纤中的子午线做简单分析。

2. 阶跃型光纤中主要特性参数的定义

(1) 相对折射指数差 Δ

目前通信用的光纤均采用的是石英系光纤,纤芯和包层的基础材料都是二氧化硅(SiO_2),因掺入杂质的不同而使得纤芯的折射指数 n_1 略高于包层的折射指数 n_2 ,它们的差极小。 n_1 和 n_2 差的大小直接影响着光纤的性能,我们引入相对折射指数差这样一个物理量来表示它们相差的程度,用 Δ 表示。为