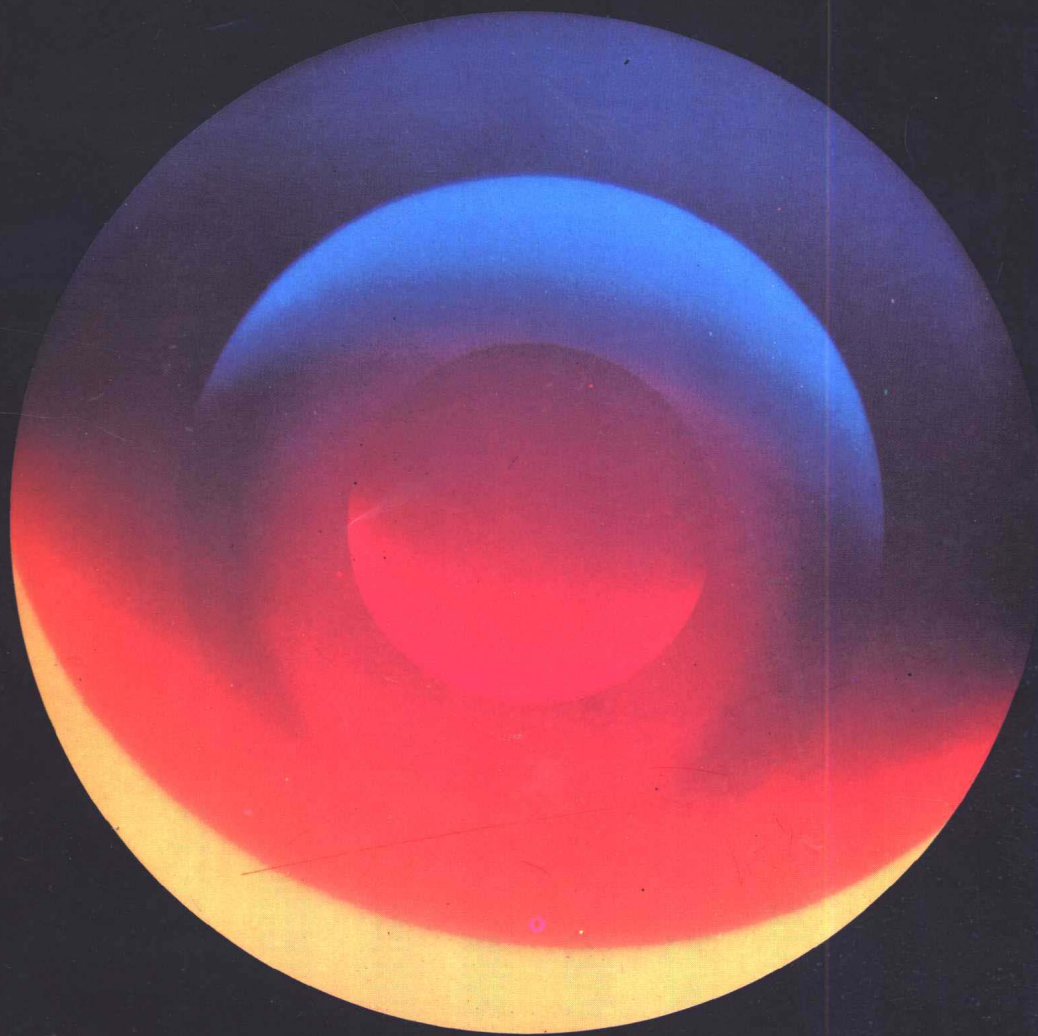


光纤通信

● 高炜烈

张



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

人民邮电出版社

电信新技术培训系列教材

光 纤 通 信

高炜烈 张金菊 编

人 民 邮 电 出 版 社

登记证号(京)143号

内 容 提 要

本书是为在职人员编写的新技术培训教材。

书中较系统地介绍了光纤通信系统中的主要问题。从光纤传输、无源、有源光器件,到光发射机、接收机、光纤系统及测量。在论述上,尽量采用物理概念来说明问题,但又有别于科普读物,有一定的理论分析和实用介绍。在写法上尽力做到通俗易懂便于自学。

本书也可供从事光纤通信管理、使用和维护的人员参考。

光 纤 通 信

高伟烈 张金菊 编

责任编辑 王青玉

*

人民邮电出版社出版发行

北京东长安街27号

北京市顺新印刷厂印刷

*

开本: 787×1092 1/16 1993年2月 第 一 版

印张: 8 4/16 页数: 64 1993年2月 第一次印刷

字数: 201千字 印数: 1—30000册

ISBN7-115-04909-2/TN·613

定价: 7.20元

前 言

电信技术的迅速发展,需要进一步提高广大干部和职工的素质与业务、技术、管理水平。为此,在各地举办的各类短期培训班讲义的基础上,我们组织统编了一套“电信新技术培训系列教材”,并将陆续出版,供全国电信干部、职工培训和继续教育使用。

“电信新技术培训系列教材”力求以简明通俗的语言和理论联系实际的特点来讲解高深的技术理论,便于广大干部职工在短期培训或自学时使用。由于时间仓促、经验不足,书中难免有缺点与不足之处,希望各地在使用过程中,及时把意见反映给我们,以便今后修订。

邮电部电信总局

邮电部教育司

1992年8月

目 录

第一章 概述

- 1.1 光纤通信的发展概况 (1)
- 1.2 光纤通信的特点 (1)
- 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 光纤的结构与分类 (4)
- 2.2 用射线法分析光波在光纤中的传输 (7)
- 2.3 用波动理论简要分析光波在均匀光纤中的传输 (17)
- 2.4 单模光纤 (21)
- 2.5 光纤的损耗特性及色散特性 (24)
- 2.6 光缆的结构和种类 (29)
- 复习思考题 (32)

第三章 光路无源器件

- 3.1 光纤连接器 (33)
- 3.2 光定向耦合器 (34)
- 3.3 光衰减器 (35)
- 3.4 光隔离器 (36)
- 复习思考题 (37)

第四章 光源和光发射机

- 4.1 与激光器有关的几个概念 (38)
- 4.2 激光器的一般工作原理 (41)
- 4.3 半导体激光器(LD) (44)

4.4 半导体发光二极管(LED)	(51)
4.5 光源的调制.....	(52)
4.6 光发射机.....	(54)
复习思考题	(57)
第五章 光电检测器与光纤数字接收机	
5.1 光电检测器.....	(59)
5.2 光纤数字接收机.....	(64)
复习思考题	(78)
第六章 光纤通信系统	
6.1 强度调制直接检波光纤通信系统的组成.....	(79)
6.2 光纤通信中的码型.....	(84)
6.3 光纤通信系统设计概述.....	(89)
6.4 光纤通信中的复用系统.....	(99)
6.5 光纤通信多终端网络系统	(102)
6.6 外差光纤通信系统	(105)
6.7 光纤的非线性效应和光孤立于通信	(108)
复习思考题.....	(109)
第七章 光纤及光纤通信系统的测量	
7.1 光纤参数的测量	(111)
7.2 光纤通信系统的测量	(119)
复习思考题.....	(121)
参考书目.....	(122)

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频,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 光纤通信的发展概况

光波是人们最熟悉的电磁波,其波长在微米级、频率为 10^{14} 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,短波段是指波长为 $0.85 \mu\text{m}$,长波长段是指 $1.31 \mu\text{m}$ 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 年美国人 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,在短短的一、二十年中,已从 $0.85 \mu\text{m}$ 短波长多模光纤发展到 $1.31 \mu\text{m} \sim 1.55 \mu\text{m}$ 的长波长单模光纤,同时开发出许多新型光电器件,激光器寿命已达数十万小时甚至百万小时,一些国家相继建成了多条长距离光纤通信系统。

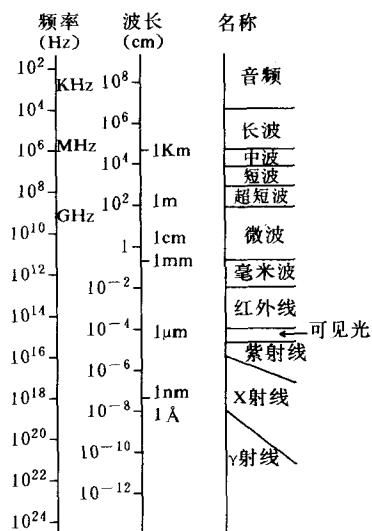


图 1-1 电磁波谱

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,是由于它具有以下的突出优点而决定。

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 $10^3 \sim 10^4$ 倍,所以通信容量约可增加 $10^3 \sim 10^4$ 倍。

2. 损耗低

目前实用的光纤均为 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,衰减有最低点,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

目前实用的光纤通信系统,普通采用的是数字编码、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。

强度在这里即指光强,是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,使之随信号电流成线性变化;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,发送光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),它们的共同点都是通过加正向偏置电流而使其发光的半导体二极管,所不同的是 LD 发出的是激光,而 LED

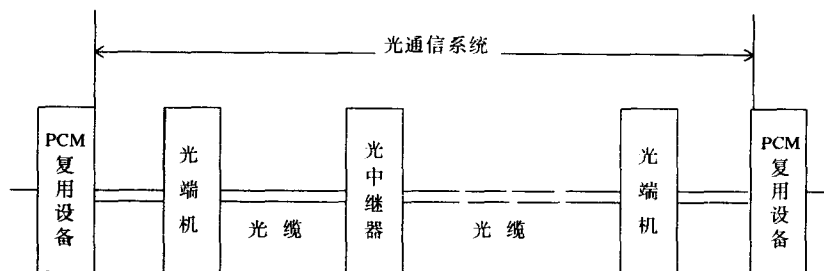


图 1-2 光纤通信传输系统的基本构成

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,恢复为送入发送端时的电信号,再送至接收电端机。

以上就是整个光纤通信的过程。它与一般通信过程所不同的主要有两点:一是传输光信号;二是利用光纤作为媒质传输手段。

强度调制直接检波系统构成简单,是目前光纤通信所普通采用的形式。

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现用的电缆通信网,这已为各国所公认。在未来的信息社会中,交换大量信息的信息网络也将由光纤通信网路来构成。

光纤通信作为一门新学科来讲,其发展的速度与潜力在通信史上很少有其它技术可与之相比。目前,单模光纤的生产已完全实用化,它的传输频带达几十吉赫以上。在 $1.31\mu\text{m}$ 的损耗是 0.5dB/km ,在 $1.55\mu\text{m}$ 的损耗是 $0.2\sim 0.3\text{dB/km}$,已接近理论极限值。

为适应远距离高速、宽带光纤通信传输的需要,专用的光纤传输的集成电路和光纤放大器的研究都有新的突破。相干光纤通信系统的研制成功将使我们有可能把现有光纤通信容量提高几个数量级,一次传送距离为几百公里的通信系统可望建立;新的红外光纤材料的研究,有可能使光纤的衰减再减少两、三个数量级,这样可使一次传输距离达到成千上万公里。这些方面的研制工作正在进行,它们的实现不少是可望可及的。

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、光纤的传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。

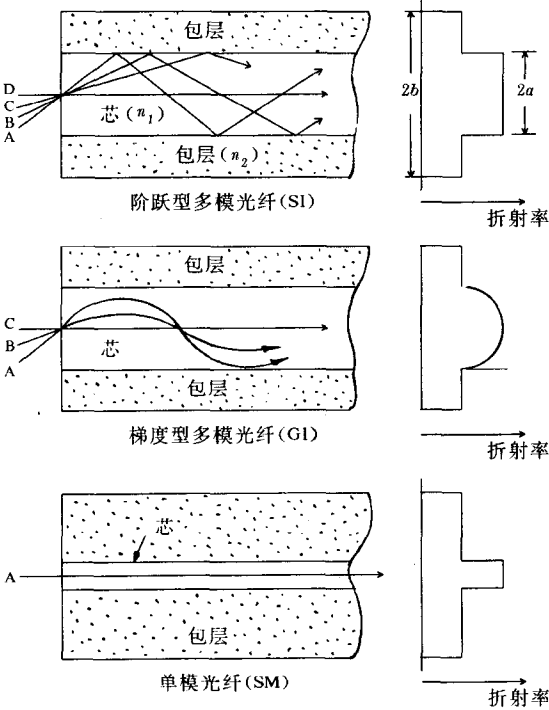


图 2-1 裸光纤结构示意图

2.1 光纤的结构与分类

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 $2b$ 。

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、涂覆层及套塑四部分组成。包层的外面涂覆一层很薄的涂覆层,涂敷材料为硅酮树脂或聚氨基甲酸乙酯,涂敷层的外面套塑(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分类。

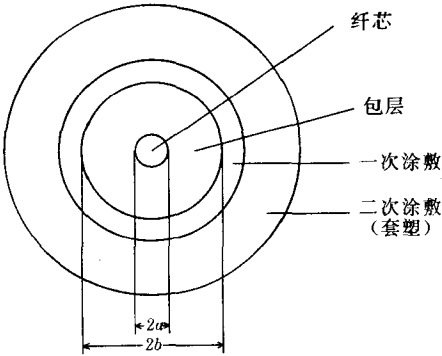
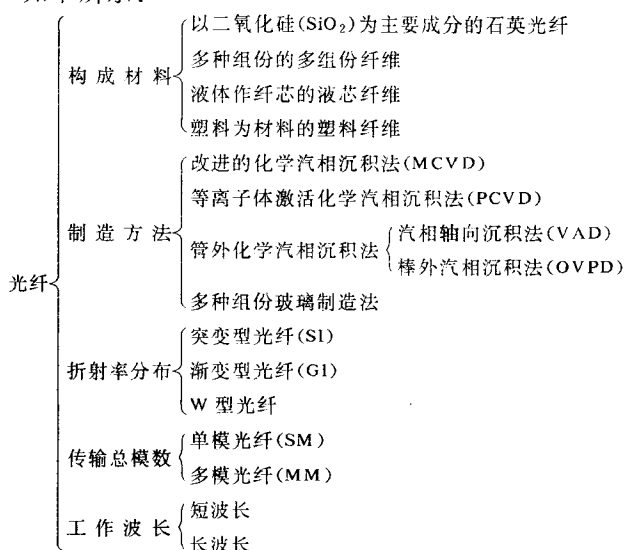


图2-2 光纤芯线的剖面构造

如下所示:



目前通信上采用的多为石英系光纤,下面将有代表性的常用的光纤做一简单介绍。

一、按照折射率分布不同来分

通常采用的是均匀光纤(突变型光纤)和非均匀光纤(渐变型光纤)两种。

1. 均匀光纤

光纤纤芯的折射率 n_1 和包层的折射率 n_2 都为一常数,且 $n_1 > n_2$,在纤芯和包层的界面处折射率呈阶梯型变化,这种光纤称为均匀光纤,又称为突变型光纤,可用 SI 表示。结构如图 2-3(a)所示。

2. 非均匀光纤

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。这种光纤称为非均匀光纤,又称为渐变型光纤,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

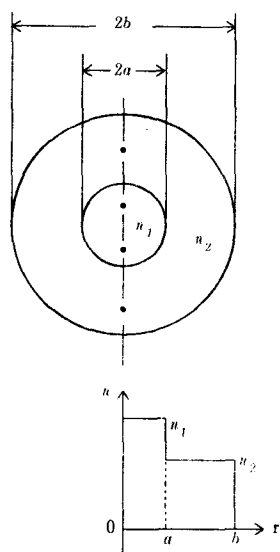
所谓模式,实质上是电磁场的一种分布形式。模式不同,其分布不同,根据光纤中传输模式数量来分,可分为单模光纤和多模光纤。

1. 单模光纤(SM—Single mode fiber)

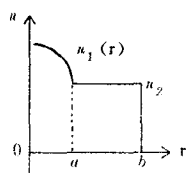
单模光纤的纤芯直径很小,约为 $4\sim 10\mu\text{m}$,理论上只传输一种模式。

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。

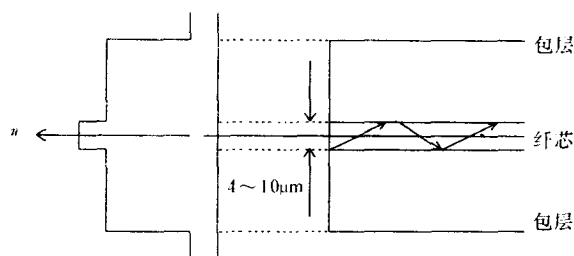


(a)均匀光纤的折射率剖面分布

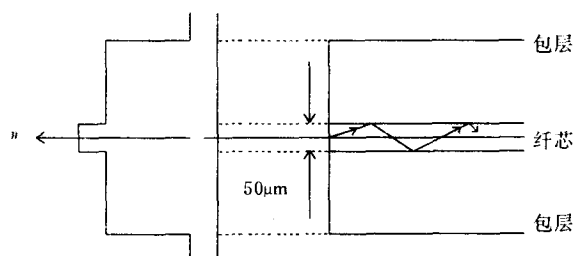


(b)非均匀光纤的折射率剖面分布

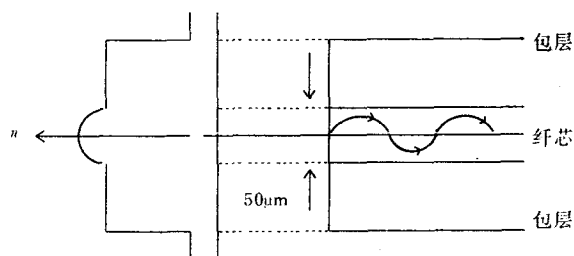
图2-3 光纤的折射率剖面分布



(a)单模光纤



(b)多模均匀光纤



(c)多模非均匀光纤

图2-4 光纤中的光线轨迹

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,前者称为多模均匀光纤,后者称为多模非均匀光纤,其光射线轨迹如图2-4(b)、(c)所示。

多模均匀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。

多模非均匀光纤纤芯直径一般也为 $50\sim 75\mu\text{m}$,但由于纤芯中折射率随半径的增加而减小,利用这个特点,可获得比较小的模式色散。^[注]因此,这种光纤频带较宽,容量较大,是八十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非均匀光纤。

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。

[注]:关于模式、主模、色散等概念,将在后面作较细致的讨论。

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图来,即如图 2-5 所示。

如果均匀平面波是在均匀理想介质^[注1]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--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 $V = \frac{c}{n}$ ^(注2);如果是在空气中

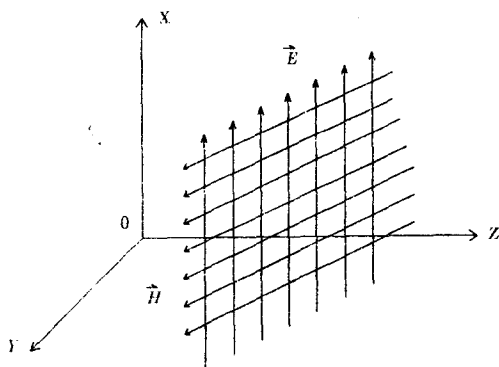


图 2-5 沿正 Z 轴传播的均匀平面波

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

$$\omega = 2\pi f$$

$$c = f \cdot \lambda_0$$

[注1]:理想介质就是完全不导电的媒质,它的电导率 $\sigma = 0$ 。而均匀理想介质,是指在介质中,除 $J_c = 0, \rho = 0$ 外,各处的 ϵ 和 μ 都相等,为一常数。

[注2]:折射指数 n 的物理概念将在下面介绍,式中 c 表示光速。

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, 可称为光射线。当光射线射到两种介质交界面时, 将发生反射和折射。

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。

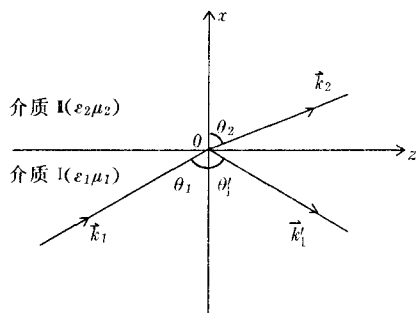


图 2-6 平面波的反射和折射

光射线 $\vec{k}_1$ 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 $\vec{k}_1'$ 方向返回介质 I, 称为反射波; 一部分光波将沿 $\vec{k}_2$ 方向进入介质 II, 称为折射波。图中 $\vec{k}_1, \vec{k}_1', \vec{k}_2$ 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。

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, (2-2) 式称为反射定律, (2-3) 式称为折射定律。

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

$$R = \frac{E'_{01}}{E_{01}} = |R| e^{j2\varphi_1} \quad (2-5)$$

$$T = \frac{E_{02}}{E_{01}} = |T| e^{j2\varphi_2} \quad (2-6)$$

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值,分别表示反射波、折射波和入射波的大小之比; $2\varphi_1$ 和 $2\varphi_2$ 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。

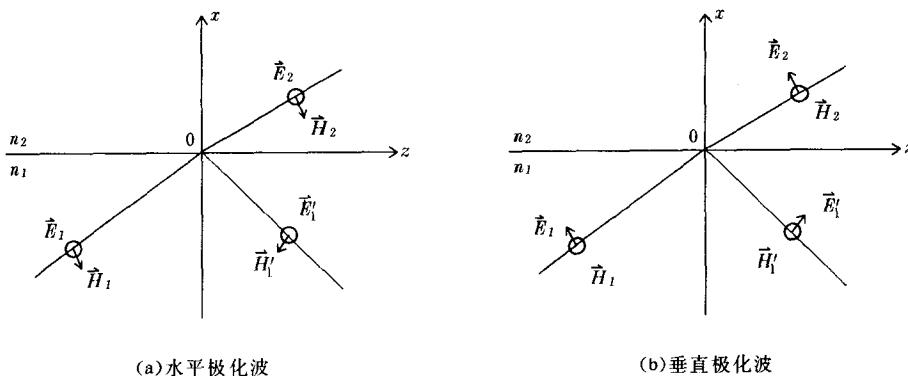


图 2-7 水平极化波与垂直极化波的反射和折射

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 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: $n_1 > n_2$; $90^\circ > \theta_1 > \theta_c$,均匀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):

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

式中 $E_1 = E_{01}e^{-jk_1 \cdot r}$ 为入射波电场强度

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

其中:

$\vec{k}_1 \dots\dots$ 为入射波的波矢量;

$\vec{k}'_1 \dots\dots$ 为反射波的波矢量;

$\vec{r} \dots\dots$ 为矢径,代表某点的位置矢量;

$E_{01} \dots\dots$ 为入射波或反射波的复数振幅;

$k_{1x} \dots\dots$ 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

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

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

入射波、反射波、折射波的波矢量沿坐标轴方向的分量,可见图 2-8 所示。

从(2-9)式中可看出,此式共包含两部分:

第一部分为: $2E_{01}\cos(k_{1z}x + \varphi_1)$ 这是合成波的幅度成份,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: $e^{-j(k_{1z}z - \varphi_1)}$ 是合成波的相位成份,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。

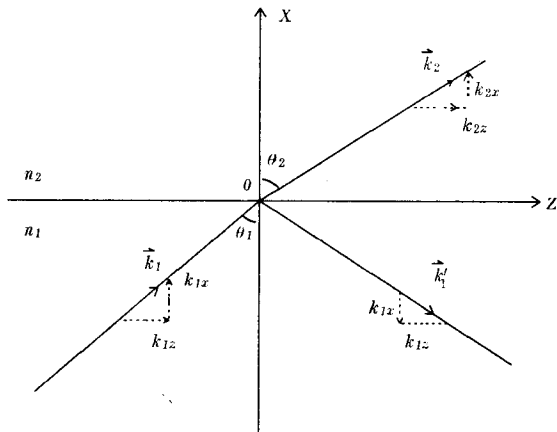


图2-8 波矢量的分量

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(过程从略), 得出

$$\begin{aligned} E_2 &= E_{02}e^{-jk_2z} \\ &= E_{02}e^{-\alpha}e^{-j(k_{2z}z - \varphi_1)} \\ &= E_{01}|T|e^{-\alpha}e^{-j(k_{2z}z - \varphi_1)} \end{aligned} \quad (2-10)$$

式中:

k_{2z} 为折射波的波矢量在 Z 方向的分量, 为 $k_{2z} = k_2\sin\theta_2 = k_0n_2\sin\theta_2$

根据折射定律, 可得出 $k_{2z} = k_0n_1\sin\theta_1$

E_{02} 为折射波的复数振幅, 为 $E_{02} = E_{01}|T|$

其中 $|T|$ 是折射系数的模值。

α 为 X 方向的衰减常数, 为 $\alpha = k_0n_1\sqrt{\sin^2\theta_1 - \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2}$

从(2-10)式中可看出共包含两部分:

第一部分: $e^{-\alpha}$ 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: $e^{-j(k_{2z}z - \varphi_1)}$ 是波的相位成份,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

$$k_{2z} = k_0n_1\sin\theta_1 = k_{1z}$$

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