

光纤通信

马玉琨 苏新红 刘艳昌 主编

西北工业大学出版社

光 纤 通 信

主编 马玉琨 苏新红 刘艳昌

编者 张海燕 程 芳 刘祖鹏



西北工业大学出版社

【内容简介】 本书简单介绍了光纤通信系统的知识,包括光纤通信的历史与现状,光纤通信的优缺点,光纤通信系统的组成;光纤的结构,光纤导光的几何原理,光纤传输特性;光缆的结构、类型和识别,光缆的铺设;光源,光检测器和光无源器件;光发射机,光接收机和光纤通信系统线路码型;SDH 的优点、原理和帧结构,SDH 对 PDH 的兼容;光纤放大器技术,光波分复用技术。本书力求用最简单的内容介绍光纤通信的基础知识。

本书既可作为本专科院校在校学生的专业课教材,也可作为相关从业人员的培训教材和参考资料。

图书在版编目 (CIP) 数据

光纤通信/马玉琨,苏新红,刘艳昌主编. —西安:西北工业大学出版社,2012.12
ISBN 978-7-5612-3523-2

I. ①光… II. ①马…②苏…③刘… III. ①光纤通信 IV. TN929.11

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 276069 号

出版发行:西北工业大学出版社

通信地址:西安市友谊西路 127 号 邮编:710072

电 话:(029)88493844 88491757

网 址:www.nwpup.com

印刷者:陕西兴平报社印刷厂

开 本:787 mm×1 092 mm 1/16

印 张:7.375

字 数:173 千字

版 次:2013 年 1 月第 1 版 2013 年 1 月第 1 次印刷

定 价:15.00 元

前 言

光纤通信作为未来最重要的通信技术之一,已经在各个国家得到了大力发展。对电子通信类专业学生进行光纤通信知识的培养有重要的意义,信息类专业的相关从业人员也需要进行相应的培训。

光纤通信是一种以光为传输载体的通信技术,与传统电通信有着本质的区别。光纤通信课程也是一门集理论与实践相结合的课程。有鉴于此,本书在对内容的安排上,力求简单明了,在讨论光纤通信理论知识的基础上,增加了光缆敷设的内容。读者在进行本书内容的学习时,不必花过多的时间去研读复杂的公式推导,只需要对相关内容进行学习即可掌握光纤通信的常用知识,这也正是本书编写的目的。

本书共分7章,第1章是绪论,重点介绍了光纤通信的发展历史、现状,光纤通信的优点和光纤通信系统的组成;第2章是光纤,主要介绍了光纤的结构、几何导光原理、数值孔径和时间延迟等技术参数以及光纤的传输特性等;第3章是光缆,主要介绍了光缆的结构、类型、型号识别以及架空光缆、管道光缆和直埋光缆的敷设方法与注意事项;第4章是通信用光器件,主要介绍了光与物质的三种作用、激光器的工作原理、光检测器的工作原理和光纤通信常用的无源光器件;第5章是光端机,主要介绍光发射机的原理及特性、光接收机的原理及特性和光纤通信常用线路码型;第6章是同步数字体系,主要介绍PDH的缺点、SDH的优点、SDH的速率及帧结构、SDH对PDH的兼容过程、SDH自愈网和SDH网同步技术等;第7章是光纤通信新技术,主要介绍了光波分复用技术和光纤放大技术。

在每章的章末设置了少量的思考题或习题,可供读者复习时回忆学习过的知识。

从以上内容安排可以看出,本书不注重公式推导,注重光纤通信相关重点基础知识的介绍,读者可以很轻松地掌握这些必须掌握的知识。

本书第1章由程芳编写,第2章由马玉琨编写,第3章由张海燕编写,第4章由苏新红和刘艳昌编写,第5~7章由刘祖鹏编写。

由于水平所限,书中难免有不足之处,敬请读者批评指正。

编 者

2012年9月

目 录

第 1 章 概论	1
1.1 光纤通信发展的历史和现状	1
1.2 光纤通信的优点和应用	4
1.3 光纤通信系统的基本组成	6
习题与思考题	6
第 2 章 光纤	7
2.1 光纤结构和类型	7
2.2 光纤传输原理——几何光学	10
2.3 光纤特性	14
2.4 光纤特性测量方法	18
思考题	21
习题	21
第 3 章 光缆	22
3.1 光缆的结构	22
3.2 光缆的型号识别	27
3.3 光缆敷设	31
3.4 光缆线路维护	37
习题与思考题	40
第 4 章 通信用光器件	42
4.1 光源	42
4.2 光检测器	50
4.3 光无源器件	55
习题与思考题	62
第 5 章 光端机	63
5.1 光发射机	63
5.2 光接收机	68
5.3 线路编码	71

思考题	76
第 6 章 数字光纤通信系统	77
6.1 准同步数字系列 PDH	77
6.2 同步数字系列 SDH	79
6.3 SDH 中的复用与映射	85
6.4 SDH 网络单元	88
6.5 SDH 传送网	90
6.6 SDH 自愈网	93
6.7 SDH 网同步	96
6.8 中国数字同步网的网络结构.....	97
6.9 SDH 网管功能	98
思考题	99
第 7 章 光纤通信新技术.....	100
7.1 波分复用技术	100
7.2 光纤放大器	106
思考题.....	111

第 1 章 概 论

重点:

- 光纤通信的优点
- 光纤通信系统模型

光纤通信作为当今社会主流的通信方式之一,具有很多其他通信方式不可比拟的优点,本章将介绍光纤通信的发展历程及基本概念等知识。

1.1 光纤通信发展的历史和现状

自人类掌握火的使用方法以来,光就作为一种通信方式在人类进化的过程中起到了非常重要的作用。

1.1.1 光通信的历史

远古时代,猿人以及后来的原始人类,懂得利用火把驱赶猎物。这是人类利用光的最初形态。随着历史的推移,战争成为了伴随人类的重要事件。为赢得战争,为快速传递战事情报,陆军部队常使用“烽火”。海军诞生后,由于没有现代无线电通信手段,舰队的指挥难度特别大,为便于调动军舰,海军常采用“旗语”。旗语现在是世界各国海军通用的语言。不同的旗子,不同的旗组表达着不同的意思。

✱小故事:周幽王三年(公元前 779 年),幽王姬宫涅骄奢淫逸,自从得到褒国进献的美女褒姒后,封为宠妃,整天沉溺于佳丽之中,朝政荒废。褒姒生性不笑,面对宫中玉宇琼楼,锦衣玉食,她毫无悦色。褒姒美艳无比,但整天愁云密布成为一大憾事。幽王欲睹褒姒笑容,大臣们想尽千方百计始终不得效果。一天幽王出游骊山,佞臣虢石父献出烽火戏诸侯拙劣计策,幽王决意一试,遂命点燃烽火。各路诸侯见烽火报警,以为京城出现敌情。迅速整装带兵而至。见君臣安然无恙,且游兴正浓,感到莫名其妙。问其原因,对方笑而不答。看到这种场面,褒姒忍不住开怀大笑。“诸侯悉至,至而无寇,褒姒乃大笑”(《史记·周本纪》)。看到褒姒终于开了笑口,而且笑时姿态更美,昏君乐得忘乎所以。风尘仆仆的诸侯终于明白,烽火报警,调兵遣将,原本为博宠妃欢心。王命如山,无可奈何,只得快快离去。为讨褒姒再开笑颜,幽王故伎几度重演。后来褒姒生了儿子,幽王十分高兴,取名伯服。公元前 774 年,幽王废了申王后和太子宜臼,立褒姒为王后,伯服为太子。同时重用善谀好利的奸臣虢石父为卿,国人怨声载道。申王后和宜臼把这些情况告诉父亲申侯,申侯非常愤慨,毅然联合两个诸侯攻打西周。兵临城下,宫涅慌忙命令点燃烽火报警。屡受戏谑的诸侯以为又是昏君在讨好美人,按兵不动,镐京陷落,幽王被杀,西周 300 年历史宣告结束。(源:<http://baike.baidu.com/view/18345.htm>)

1.1.2 “电”时代的光通信

1880 年,美国人贝尔(Bell)发明了用光波作载波传送话音的“光电话”。贝尔光电话是现代光通信的雏型,也是第一台需要使用电的光通信设备,贝尔及其发明的光电话如图 1.1 所示,基本原理如图 1.2 所示。

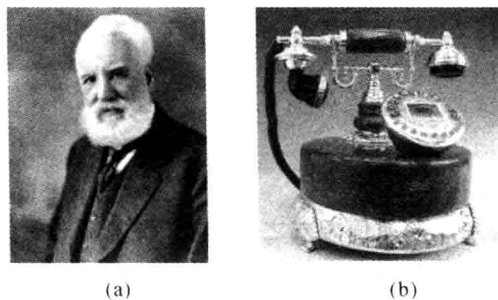


图 1.1 贝尔及其发明的光电话

(a) 贝尔; (b) 贝尔光电话

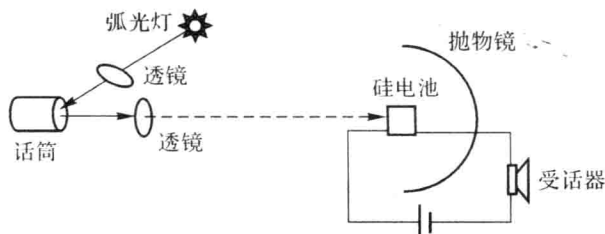


图 1.2 贝尔光电话原理图

✿ 贝尔简介:1847 年 3 月 3 日亚历山大·格拉汉姆·贝尔出生于苏格兰爱丁堡。1870 年贝尔移民到加拿大,一年后到美国。1882 年他加入美国国籍。贝尔本人是一个声学生理学家和聋哑人语的教师。在他之前,德国人菲利普·雷斯曾发明过一台电话机,但其传声效果极坏,实际上无法被使用。1876 年 3 月 10 日贝尔与他的同事试验了世界上第一台可用的电话机。此外贝尔还发明了一台测量听力的仪器,一台可用来发现人体内金属的仪器以及其他一些发明创造。除了发明电话,亚历山大·格拉汉姆·贝尔还发明了载人的巨型风筝,为加拿大海军发明了用于在第二次世界大战时与德国 U-Boat 抗衡的水翼船,改良了留声机(gramophone)。1922 年 8 月 2 日亚历山大·格拉汉姆·贝尔逝世于加拿大巴德克。(摘自:<http://baike.baidu.com/view/4646.htm>)

贝尔光电话利用弧光灯产生一束光,通过透镜投射到话筒端面的薄膜上,人对着话筒说话时,话筒端面的薄膜会随着人的声音震动,通过薄膜反射的光的传输特性也跟随薄膜的变化产生与人的声音关联的变化。变化的光信号通过空气传到接收端的硅电池上,使硅电池的参数发生变化,从而使接收端回路的电流发生改变,喇叭根据此变化的电流还原出说话人的声音。

烽火、旗语以及贝尔的光电话都是利用大气作为传输媒质来传递光信号,有着不可克服的缺点。遇到恶劣的天气,如雨、雪和雾天时,或者传播路径上有障碍物时,这三种通信方式均无法使用。究其原因,是没有一种稳定的能产生光的器件和没有密闭的能传输光的媒介。

为解决传输媒质的问题,科学家做了很多尝试,例如在密闭环境中使用平面镜或凸透镜构成传输路径,如图 1.3 所示。

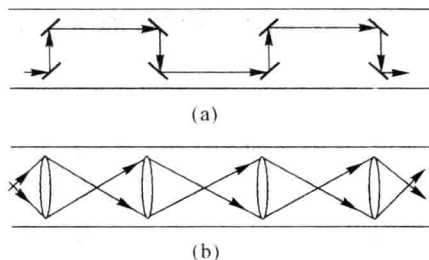


图 1.3 平面镜波导和透镜波导

(a)平面镜波导; (b)透镜波导

上述两种方法虽然能克服自由传播时受外界条件变化的影响,但由于安装及维护困难、成本太高和衰减太大等原因,无法在实际的通信系统中使用。

因此,1880 年之后的几十年中,光通信几乎没有实质性的发展。其主要原因在于:没有稳定的光源和能长距离传输光信号的介质。

1.1.3 光纤通信

自 1880 年之后,光通信沉寂了 80 多年,直到 1966 年,高锟发表了一篇题为《光频率介质纤维表面波导》的论文,提出光导纤维在通信上应用的基本原理,描述了长距离及大容量光通信所需绝缘性纤维的结构和材料特性。高锟提出制造出高纯度的玻璃,并解决制造工艺等问题,就能够利用玻璃制作光导纤维,从而高效传输信息。这一设想提出之后产生的影响不亚于莱特兄弟提出制造飞机,有人称之高锟是痴人说梦,他提出的理论不可能实现,也有人支持高锟,说他的理论能使通信产生革命性的变化。在其他科学家的共同努力下,高锟的理论变成了现实。

1970 年,美国康宁(Corning)公司产生出损耗为 20dB/km 的石英光纤,1972 年,康宁公司又生产出高纯石英多模光纤将损耗进一步降低到 4 dB/km。1973 年,美国贝尔(Bell)实验室将光纤损耗降低到 2.5 dB/km。1974 年降低到 1.1 dB/km。1976 年,日本电报电话(NTT)公司将光纤损耗降低到 0.47 dB/km(波长 1.2 μm)。在以后的 10 年中,波长为 1.55 μm 的光纤损耗:1979 年是 0.20 dB/km,1984 年是 0.157 dB/km,1986 年是 0.154 dB/km,接近了光纤最低损耗的理论极限 0.149 dB/km。

随着第一个光纤系统于 1981 年成功问世,高锟“光纤之父”美誉传遍世界。

***高锟简介:**高锟,华裔物理学家,生于中国上海,祖籍江苏金山(今上海市金山区),拥有英国、美国国籍并持中国香港居民身份,目前在香港和美国加州山景城两地居住。高锟为光纤通讯、电机工程专家,华文媒体誉之为“光纤之父”、普世誉之为“光纤通讯之父”(Father of Fiber Optic Communications),曾任香港中文大学校长。2009 年,与威拉德·博伊尔和乔治·埃尔伍德·史密斯共享诺贝尔物理学奖。(源:<http://baike.baidu.com/view/131894.htm>)

如前所述,光通信需要解决路径与光源两大问题。1970 年,美国贝尔实验室、日本电气公司(NEC)和苏联先后研制成功室温下连续振荡的镓铝砷(GaAlAs)双异质结半导体激光器(短波长)。此后各种能长时间工作的高性能激光器相继出现。因此,1970 年是光纤通信发生

根本转变的一年,是光纤通信的里程碑。

1.2 光纤通信的优点和应用

自 1970 年第一根低损耗光纤诞生,短短的 40 年时间中,光纤通信经历了从多模到单模,工作波长从短波长到长波长的变化,从最初的 850 nm 波长段发展到 1310 nm 波长段,再到现在的 1550 nm 波长段。目前,光纤通信已经进入光孤子通信阶段。从 20 世纪 80 年代开始,光纤已经大规模商用了,进入 21 世纪以后,光纤已成为信息宽带传输(特别是长途干线传输)的主要媒质,光纤通信系统也已成为未来国家信息基础设施的支柱。

光纤通信之所以能得到迅速发展,与其自身的优点密不可分。

1. 光纤通信容量非常大

通信用信号频带分布如图 1.4 所示。

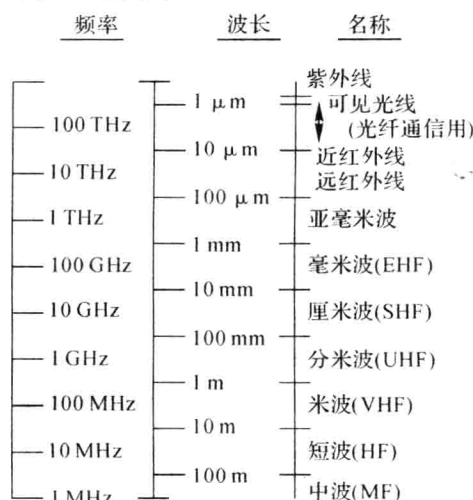


图 1.4 通信用信号频带

从图 1.4 可以看出,无线电信号所使用的频带数量级在 MHz(即 10^6 Hz),而光信号所处频带数量级为 THz,(即 10^{12} Hz)。在相对带宽相同的情况下,光信号的频带宽度是无线电信号的 10^6 倍,根据香农公式,在信噪比相同时,光纤通信的系统容量是无线电通信的 10^6 倍。

一根光纤到底能容纳多少人同时通信呢?下面作简单的数量级估算。在理想状态下,假定通信的光波波长为 850 nm,相对带宽为 1%,则信号中心频率为 3.5×10^{14} Hz,一个信道的频带宽度为 3.5×10^{12} Hz。按每个语音信号传输时需要 4 kHz 的带宽计算,采用频分复用时,一根光纤能容纳约 10^8 人同时进行话音通信,这个容量是电通信不可能达到的。

实际上,考虑通信时的其他情况,目前,一根普通光纤也最少能支持 3 万人同时语音通信。若再采用空分复用技术使一根光缆中包含多条光纤时,光缆的通信容量将成倍数增加。

2. 光纤通信的损耗小,传输距离长

目前常用的电通信传输介质包括双绞线、同轴电缆和自由空间。双绞线的中继距离一般在 100 m 左右,同轴电缆的中继距离最长也不超过 10 km,在自由空间中传输的无线电信号的中继距离虽然可以达到几十千米,但此时无线电发送设备的输出功率可能要达到几十瓦,甚至

上百瓦。电通信的中继距离近的原因主要是介质对信号的损耗太大。而光纤通信的损耗系数可以达到 0.154 dB/km, 以下简单讨论光纤的中继距离长的原因。

损耗系数的计算公式为

$$\alpha = \frac{10}{L} \lg \frac{P_i}{P_o} \quad (\text{dB/km}) \quad (1-1)$$

若损耗系数 $\alpha = 0.154 \text{ dB/km}$, 当 $L = 1$ 时

$$\frac{P_i}{P_o} = 10^{0.0154} = 1.036 \approx 1 \quad (1-2)$$

$$\frac{P_o}{P_i} = \frac{1}{1.036} = 0.965 \quad (1-3)$$

即利用损耗为 0.154 dB/km 的光纤传输信号时, 光传输 1 km 后, 信号强度变为输入信号的 96.5%, 衰减非常微弱。所以光纤的传输距离可以达到 80 km 以上, 最长可以达到 200 km, 而此时光信号的光纤功率只在毫瓦甚至微瓦级。

随着光纤制造材料的改变, 将来可能采用超高纯度的塑料作为光纤的生产材料, 损耗可以降低到 10^{-9} dB/km 以下, 中继距离可以达到上千千米甚至更长。

3. 重量轻、体积小

常见的光纤的芯径为 $125 \mu\text{m}$, 且材料为 SiO_2 , 其重量只有单管同轴电缆的几百分之一。考虑到增强光纤的机械性能, 在将光纤制成光缆时, 常需要在光缆中加入支架、铠装和护套等材料, 1 m 长的光缆重量可能会达到 300 g 以上, 是 18 管同轴电缆的三百分之一, 此时光缆的容量是电缆的几千倍。因此, 与同等容量的电缆相比, 光缆的重量比电缆轻很多。

4. 抗电磁干扰性能好

无论是有线电通信还是无线电通信, 电信号均容易受到外来噪音的干扰, 这是电通信永远无法克服的缺点之一。光纤中传输的是光, 而光是不受任何电磁干扰的信号, 因此, 无论在什么环境, 光纤通信的抗电磁干扰性能都远远好于电通信。

5. 泄漏小, 保密性能好

电通信均需使用交流信号, 交流信号存在变化的电场, 变化的电场会产生变化的磁场, 从而产生向外传输的电磁场, 也就是人们常说的“辐射”。只要使用交流信号, 就一定有“辐射”的产生。同时, 直流信号又无法用于通信, 因此检测出“辐射”信号就能计算出通信的信号。目前, 很多的监听系统及电缆故障检测系统常用检测辐射信号的方法工作。同时, 一个信道的辐射很可能影响到相邻信道上的信号, 产生干扰, 严重时可能产生“串话”现象。

光纤中的光信号不会产生“辐射”, 也不会穿过光纤, 能保证光纤中的信号不被任何人监听, 更不会导致“串话”现象的出现。

6. 节约有色金属材料, 有利于资源合理使用

电缆使用的材料是铜和铅等金属材料, 目前地球上的铜矿已经接近枯竭。光纤通信使用的材料和沙的主要成分相同, 是 SiO_2 , 地球上的沙可谓是“取之不尽用之不竭”的资源。要建立一条由北京到上海的通信线路, 如果采用电缆, 则需要几百吨的铜和上千千克的铅, 而建立一条同样距离且通信容量大很多的光纤线路, 则只需要几十千克的石英。

因为具有如此多的优点, 光纤通信成为了不可缺少的一种通信方式。但光纤也存在一些缺点: ①光纤修复困难。由于光纤的直径只有 $125 \mu\text{m}$, 且不能采用电缆的连接方

式,一旦光纤损坏,修复将会非常困难。②敷设困难。光纤的粗细决定了不能采用很大的力量拖曳光缆,敷设光纤时,必须采用专用设备匀速拉动光缆。③制造工艺复杂。光纤是通过将石英玻璃棒拉成细丝而制成的,制造过程中非常容易出现折断或产生气泡等问题,导致光纤无法用于通信。同时光纤还存在易被动物损坏和怕水等缺点。随着光纤制造和敷设技术的提高,光纤的这些缺点将会被克服。

光纤通信的优点是其他所有通信系统都无法比拟的,因此目前各种通信方式的长距离大容量传输均采用光纤做介质。因此光纤通信被广泛应用于移动通信、计算机网络、广播电视网和日益成熟的物联网。

1.3 光纤通信系统的基本组成

广义的光纤通信系统如图 1.5 所示。

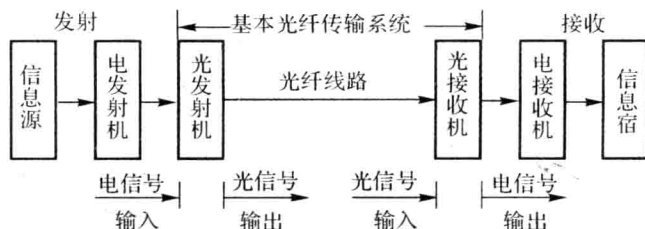


图 1.5 光纤通信系统模型

信息源是将自然界中的媒体转换成基带电信号,以便处理和传输。电发射机将信息源产生的基带信号调制能在信道中传输的频带信号,并将此频带信号向光发射机输入。光发射机将电发射机传输来的电信号变成对应的光信号,实现“电/光转换”,并将光信号通过耦合技术耦合进光纤。光纤负责将光信号以最低的损耗和最小的畸变传到接收端。光接收机接收光纤的传输来的光信号,并将其转变成电信号,实现“光/电转换”。电接收机负责解调,将频带信号还原成基带信号。信息宿将基带电信号转换成人们能感知的媒体。

狭义的光纤通信系统只包含与光有关的设备,即由光发射机、光纤和光接收机组成的系统。

习题与思考题

1. 光纤通信的发展历史是怎样的?
2. 光纤通信的优点是什么?
3. 光纤通信的缺点是什么?

第 2 章 光 纤

本章内容

- 光纤的结构和类型。
- 光纤的导光原理。
- 光纤的特性。
- 光缆的结构和种类。

本章重点

- 光纤的结构和类型。
- 光纤的特性。

本章的难点

- 光纤的导光原理。。

2.1 光纤结构和类型

研究光纤结构首先要了解相关的光学知识,所以首先讨论一下光传输的基础。

2.1.1 光传输基础

1. 折射率

光线在不同的介质中的传播速度不同,描述介质的这一特征的参数就是折射率,或称折射指数。

折射率的定义式为

$$n = c/v \tag{2-1}$$

式中, v 是光在某种介质中的速度, c 是光在真空中的速度。

在折射率为 n 的介质中,光的频率不会改变,传播速度变为 c/n ,光波长变为 λ_0/n (λ_0 表示光在真空中的波长)。常见介质的折射率如表 2-1 所示。

表 2-1 常见介质的折射率

材料	空气	水	玻璃	石英	钻石
折射率	1.003	1.33	1.52 ~ 1.89	1.43	2.42

从表 2-1 中可以看出,固体的折射率一般比液体大,液体的折射率比气体大。由于空气的折射率与真空接近,计算中常将空气折射率近似为 1。

2. 全反射原理

光在两种介质的界面上,会发生折射与反射作用。但当入射光与折射光所在介质的折射

率不同时,光线发生的折射反射现象不同,如图 2.1 所示。

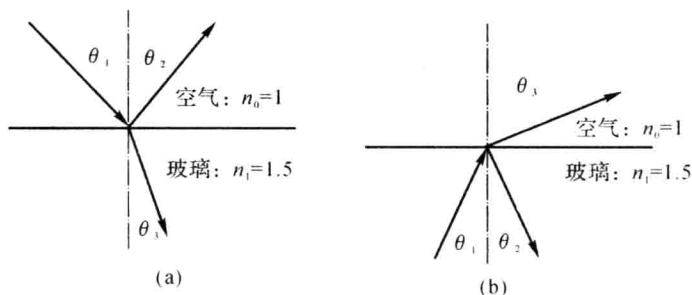


图 2.1 光线的折射与反射

(a) 入射介质折射率小于折射介质折射率; (b) 折射介质折射率小于入射介质折射率

图 2.1(a) 中,光从折射率小的介质(空气)入射进折射率大的介质(玻璃),会同时产生折射与反射现象,且入射角(θ_1)、反射角(θ_2)和折射角(θ_3)满足以下两种的关系:

(1) 入射角与反射角相同,即

$$\theta_1 = \theta_2 \quad (2-2)$$

(2) 入射角与折射角满足斯涅尔定律(也称折射定律):

$$n_0 \sin \theta_1 = n_1 \sin \theta_3 \quad (2-3)$$

式(2-3)中

$$n_0 < n_1 \quad (2-4)$$

所以

$$\sin \theta_1 > \sin \theta_3 \quad (2-5)$$

$$\theta_1 > \theta_3 \quad (2-6)$$

从式(2-2)和式(2-6)可以看出,光从折射率小的介质入射进折射率大的介质时,无论光的入射角是多大,反射光线和折射光线永远存在。根据能量守恒定律,不考虑其他原因,反射光线能量与折射光线能量之和等于入射光线的能量。反之,无论是反射光线还是折射光线,其光功率均小于入射光线的功率。

图 2.1(b) 中,光从折射率大的介质(玻璃)进折射率小的介质(空气),会同时产生折射与反射现象,且入射角(θ_1)、反射角(θ_2)和反射角(θ_3)满足以下两种关系:

(1) 入射角与反射角相同,即

$$\theta_1 = \theta_2 \quad (2-7)$$

(2) 入射角与折射角满足斯涅尔定律(也称折射定律):

$$n_1 \sin \theta_1 = n_0 \sin \theta_3 \quad (2-8)$$

式(2-8)中

$$n_1 > n_0 \quad (2-9)$$

所以

$$\sin \theta_1 < \sin \theta_3 \quad (2-10)$$

$$\theta_1 < \theta_3 \quad (2-11)$$

从式(2-7)和式(2-11)可以看出,光从折射率小的介质入射进折射率大的介质时,光的

入射角很小时,反射光线和折射光线同时存在。随着入射角的增加,折射角会比入射角增加得更快,即当入射角还没有等于 90° 时,折射角已经先等于 90° 。此时,折射光的能量非常小,可以忽略。根据能量守恒定律,反射光线能量近似等于入射光线的能量。此时,称光线发生了全反射,发生全反射时的入射角称为临界角,记作 θ_c 。

2.1.2 光纤结构

光纤是“光导纤维”的简称,是由中心的纤芯和外围的包层同轴组成的圆柱形细丝,如图 2.2 所示。

纤芯与包层均由可导光的材料制成。

为了降低光在传输过程中的损耗,需要将光聚集在纤芯中传输,即在纤芯与包层的界面上要发生全反射,此时要求纤芯的折射率(n_1)要大于包层的折射率(n_2),即 $n_1 > n_2$ 。但 $n_1 > n_2$ 仅是光在纤芯中传输的必要条件,而非充分条件或充要条件。原因在于,光线要在纤芯与包层形成的界面上发生全反射,其入射角必须大于等于临界角。

纤芯的折射率比包层大,损耗比包层低,光能量主要在纤芯内传输。包层为光在纤芯中传输提供反射面和光隔离,并起一定的机械保护作用。

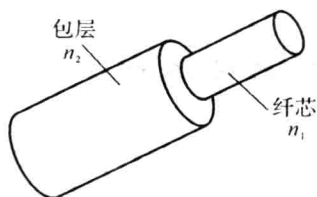


图 2.2 光纤结构

2.1.3 光纤类型

根据纤芯与包层的折射率分布的不同,通信用光纤常分为突变型多模光纤、渐变型多模光纤与单模光纤三类。

与单模光纤相比,多模光纤的直径较大,且同时有多条光线(模)在其中传输。

三类光纤的特性如图 2.3 所示。

从几何参数来看,三类光纤均是圆柱体,多模光纤的纤芯直径约为 $50\ \mu\text{m}$,包层直径约为 $125\ \mu\text{m}$,单模光纤纤芯直径约为 $10\ \mu\text{m}$,包层直径与多模光纤相同,均为 $125\ \mu\text{m}$ 。

从折射率分布来看,单模光纤与突变型多模光纤的折射率分布规律相同,都是纤芯中任意两点的折射率均相同,且都大于包层的折射率。而渐变型多模光纤的折射率是从纤芯截面的圆心处折射率最大且沿半径向外缓慢减小。

从光线传播路径看,突变型光纤中,光线在纤芯中沿折线传输,在纤芯与包层形成的界面上发生全反射作用。渐变型光纤中,光线在纤芯中沿曲线传输。单模光纤中,光线沿纤芯的轴线方向直线传输。

从输入输出脉冲比较看,单模光纤的输出脉冲与输入脉冲最相近,渐变型多模光纤次之,突变型多模光纤的输出脉冲与输入脉冲差别最大。其原因将在本书后续章节介绍。

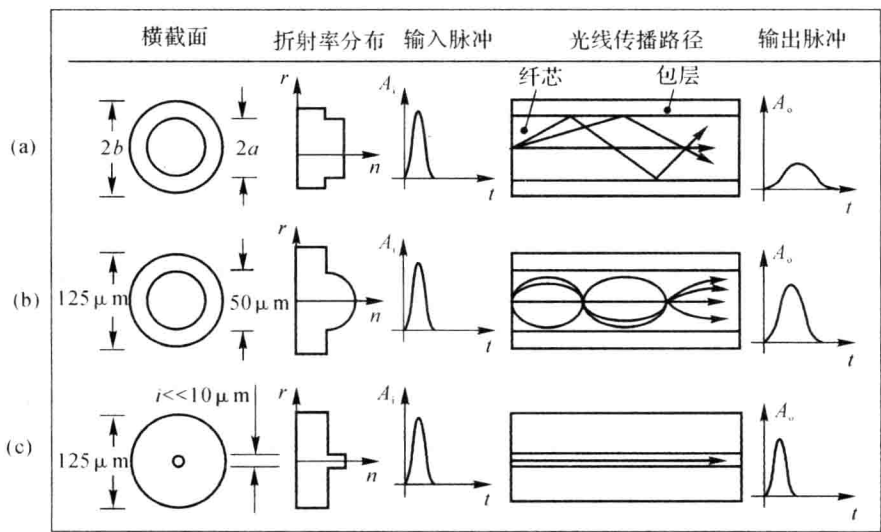


图 2.3 三类光纤特性比较

(a) 突变型多模光纤；(b) 渐变型多模光纤；(c) 单模光纤

2.2 光纤传输原理——几何光学

光具有“波粒二象性”，因此从波动理论和几何光学两个方面均能讨论光纤传输的原理。本章只介绍用几何光学方法分析光纤传输原理，且为简单起见，本节主要讨论突变型多模光纤的子午光线的传输特性。

所谓子午光线，指的是与纤芯轴线交汇的光线。根据反射原理，子午光纤每次发生全射之后都会与轴线交汇。

子午光线的传播路径如图 2.4 所示。

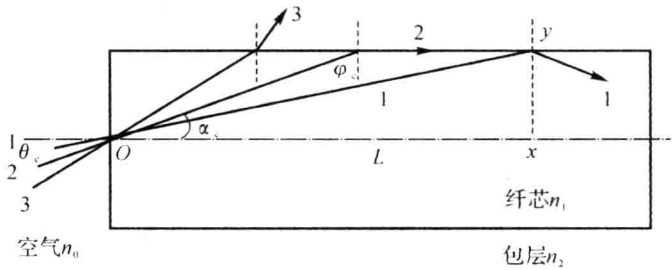


图 2.4 突变型多模光纤中子午光线传播路径

2.2.1 数值孔径

数值孔径常用字母组合 NA 表示。

图 2.4 所示的三条光线中，光线 1 和光线 2 均发生了全反射，但光线 2 处于全反射的临界状态，最便于分析。本节对数值孔径的分析从光线 2 的临界状态开始。

图 2.4 中，纤芯和包层折射率分别为 n_1 和 n_2 ，空气的折射率 $n_0=1$ ，纤芯中心轴线与 z 轴重

合。光纤2在纤芯与空气的端面上的入射角为 θ_c ，在纤芯与包层形成的界面上的入射角为 φ_c ，与轴线的夹角为 α_c 。

则根据斯涅尔定律，在纤芯与包层的界面上有

$$n_1 \sin \varphi_c = n_2 \sin \frac{\pi}{2} \quad (2-12)$$

有

$$\sin \varphi_c = \frac{n_2}{n_1} \quad (2-13)$$

对式(2-13)做反正弦运算：

$$\varphi_c = \arcsin \frac{n_2}{n_1} \quad (2-14)$$

根据互余的原理有

$$\alpha_c = \frac{\pi}{2} - \varphi_c \quad (2-15)$$

则根据斯涅尔定律，在空气与纤芯的端面上有

$$n_0 \sin \theta_c = n_1 \sin \alpha_c \quad (2-16)$$

对式(2-16)进行变形有

$$\sin \theta_c = \frac{n_1}{n_0} \sin \alpha_c = \frac{n_1}{n_0} \cos \varphi_c = \frac{n_1}{n_0} \sqrt{1 - \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2} \quad (2-17)$$

式(2-17)中， $n_0 \approx 1$ ，则数值孔径：

$$NA = n_0 \sin \theta_c = n_1 \times \sqrt{1 - \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2} = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (2-18)$$

从上面讨论可以看出，光线要在光纤中传输(发生全反射)，则在纤芯与包层界面上的入射角 φ 需要满足 $\frac{\pi}{2} > \varphi > \varphi_c$ ，光纤与轴线的夹角 α 需要满足 $\alpha < \alpha_c$ ，在空气与纤芯端面的入射角 θ 需要满足 $0 < \theta < \theta_c$ 。

数值孔径NA越大，要求纤芯折射率 n_1 比包层折射率 n_2 大得越多，此时会有如下两个结论：(1) θ_c 越大，在空气与纤芯端面上允许的入射角的范围越大，允许更多的入射光在光纤中传输，光纤的聚光能力及与光源的耦合效率就越高。(2) φ_c 越小，则光纤的入射角 φ 更容易满足 $\varphi > \varphi_c$ 的条件，若光纤发生弯曲，由于法线的改变导致入射角 φ 变小时， $\varphi > \varphi_c$ 仍然能得到满足，依然符合全反射条件，光能继续传输，反之若 φ_c 很大，当光纤发生弯曲导致入射角 φ 变小时， $\varphi > \varphi_c$ 的条件可能不再成立，光线不再发生全反射，此时将会有携带大量能量的折射光进入包层，使光线的损耗增大，严重时无法继续通信。

因此，数值孔径NA越大，光纤的接收光能力越强，抗弯曲性能越好。单从这两方面考虑，光纤通信要求数值孔径NA越大越好。

注意：由于光纤是圆柱形，所以满足入射条件 $0 < \theta < \theta_c$ 的所有光形成的形状是圆锥形。

2.2.2 时间延迟

所谓时间延迟，即是同时进入纤芯的光线，由于路径不同或传输速度不同，到达终点时存在的时间差。此处先讨论由于路径不同引起的时间差。