

高等学校教材

光纤通信

陆自南 编

29.1

电子工业出版社

内 容 简 介

本书全面而系统地介绍了七十年代新兴起来而目前正在发展日趋成熟的技术领域——光纤通信的基本原理与特点、光纤与光缆、光源与光检测、光纤系统组成与指标测试等。

本书叙述深入浅出，通俗易懂，每章后附有复习思考题，最后还给出了实验内容，便于自学和实践。

本书可作为高等院校有关光纤通信专业的教材，也可供有关研究所、工厂的科技人员参考和自学之用。

光 纤 通 信

陆自南 编

责任编辑：连潮东

*

电子工业出版社出版（北京海淀区万寿路）

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经销

山东电子工业印刷厂印刷

（淄博市周村）

*

开本：787×1092毫米 1/16 印张：12.125 字数：310千字

1989年8月第一版 1989年8月第一次印刷

印数：1—2200册 定价：2.60元

ISBN7-5053-0583-2/TN·211

出版说明

根据国务院关于高等学校教材工作分工的规定，我部承担了全国高等学校、中等专业学校工科电子类专业教材的编审、出版的组织工作。由于各有关院校及参与编审工作的广大教师共同努力，有关出版社的紧密配合，从1978年至1985年，已编审、出版了两轮教材，正在陆续供给高等学校和中等专业学校教学使用。

为了使工科电子类专业教材能更好地适应“三个面向”的需要，贯彻“努力提高教材质量，逐步实现教材多样化，增加不同品种、不同层次、不同学术观点、不同风格、不同改革试验的教材”的精神，我部所属的七个高等学校教材编审委员会和两个中等专业学校教材编审委员会，在总结前两轮教材工作的基础上，结合教育形势的发展和教学改革的需要，制订了1986~1990年的“七五”（第三轮）教材编审出版规划。列入规划的教材、实验教材、教学参考书等近400种选题。这批教材的评选推荐和编写工作由各编委会直接组织进行。

这批教材的书稿，是从通过教学实践、师生反映较好的讲义中经院校推荐，由编审委员会（小组）评选择优产生出来的。广大编审者、各编审委员会和有关出版社为保证教材的出版和提高教材的质量，作出了不懈的努力。

限于水平和经验，这批教材的编审、出版工作还会有缺点和不足之处，希望使用教材的单位，广大教师和同学积极提出批评建议，共同为不断提高工科电子类专业教材的质量而努力。

电子工业部教材办公室

前 言

本教材系按电子工业部的工科电子类专业教材1986~1990年编审出版规划,由无线电技术与信息系统教材编审委员会通信编审小组征稿,推荐出版,责任编辑洪福明教授。

本教材由上海交通大学担任主编,成都电讯工程学院洪福明教授、唐绍淑副教授和邮电部五所高级工程师卢成俊担任主审。

本课程的参考学时数为40学时,其主要内容是介绍光纤通信的基本原理与特点、光纤与光缆、光源与光检测、光纤系统组成与指标测试等。光纤通信是七十年代的新兴技术,正在飞跃发展日趋成熟。它是现代有线通信技术的发展方向,短短的实践足以证明其独特的优越性和极大的通信潜力,对现代通信系统将发生深远的影响,预计在不久的将来,光纤通信将成为当今世界上最主要的传输方式之一。本教材内容丰富、深入浅出、通俗易懂,每章都给出了复习思考题,最后还给出了实验内容。便于课堂教学与自学相结合。

本书可作为高校无线电技术、通信工程等专业本科生的教材,亦可供广大从事光纤通信的工程技术人员参考。

本教材由上海交通大学副教授陆自南编写。上海交通大学归绍升、宋文涛两位教授对本书提出了许多宝贵意见,这里表示诚挚的感谢。由于编者水平有限,书中难免还存在一些缺点和错误,殷切希望广大读者批评指正。

编 者

目 录

第一章 绪论	1
1.1 通信系统概述	1
1.2 光纤通信概述	2
复习题	8
第二章 光纤与光缆	9
2.1 光纤分类	9
2.2 光的折射与反射现象	9
2.3 光纤传光原理	10
2.4 沿光纤传输的光波的模	14
2.5 光纤的传输损耗	18
2.6 光纤的色散特性	22
2.7 光纤色散的表示方法	29
2.8 光纤与光缆的结构	32
复习题	35
第三章 光纤通信的光源	36
3.1 光的本质及激光特点	36
3.2 激光产生的条件	38
3.3 半导体激光器的原理	41
3.4 半导体激光器的结构	47
3.5 单模激光器举例	49
3.6 半导体激光器的特性	50
3.7 非相干光源——发光二极管	52
3.8 光源的发射面与接收面之间的功率传输	56
3.9 光源与光纤的耦合	58
3.10 光源调制方式及其电路	64
复习题	71
第四章 光检测器	73
4.1 真空光电二极管原理	73
4.2 光电二极管	74
4.3 雪崩光电二极管	75
4.4 APD特性	77
4.5 长波长光检测器	81
4.6 接收器件与光导纤维的耦合	83
4.7 PIN光电二极管的电路模型	84
4.8 雪崩光电二极管的电路模型	87
4.9 PIN的噪声	88
4.10 APD的噪声	94

复习题	98
第五章 光纤通信接收机	100
5.1 引言	100
5.2 光接收机的基本组成	100
5.3 噪声分析	102
5.4 场效应管和双极晶体管放大器的噪声	114
5.5 前端放大器设计	120
5.6 数字接收机的灵敏度	125
5.7 发送机和信道参数对系统性能的影响	133
5.8 模拟光接收机	136
5.9 光接收机实例	138
5.10 光检测器-前置放大组件及光接收机发展方向	141
复习题	147
第六章 光纤通信系统	148
6.1 通用光纤通信系统的组成	148
6.2 经济成本的考虑	148
6.3 调制方法	150
6.4 光纤线路编码方式	157
6.5 指标分配	162
6.6 模拟通信系统指标	165
6.7 数字通信系统指标	167
6.8 多用途服务系统	172
6.9 WDM技术和相干光技术在系统中应用	175
6.10 光纤局部网	176
6.11 光纤系统参量测量	182
复习题	183
实验	184
参考文献	188

第一章 绪 论

1.1 通信系统概述

所谓通信,从广义上说,就是把信息或消息从一个地方传送到另一个地方去。最简单的通信就是靠人力传送信息。今天的马拉松赛跑就是为了纪念公元前五百年,一位传送给在马拉松的地方抗击波斯取胜消息的希腊人。在我国除了由信使传送信件外,早就利用风筝、鸽子传送书信。

随着科学技术的发展,出现了采用电信号(或光信号)通过电信道(或光信道)来传送各种信息的近代通信系统。

任何一个最简单的通信系统至少有三个基本组成部分:

发送设备:把需要传送的信息(文字、语音、图象、数据等)变成电信号(或光信号)。

传输线路:传输信息的线路或媒质,又称信道。

接收设备:将传输线路传送来的电信号(或光信号)变成原来的信息。

发送设备把信息转换为电信号(或光信号),接收设备把电信号(或光信号)转换为信息,两者均起转换作用。所以说通信系统的基本组成是转换与传输设备。这是一切通信技术研究的基本问题。

根据传送信息的线路或媒质不同,通信系统又分为两类:凡是利用导线(或光纤、光缆)完成信息传送的一种方式称为有线通信。凡是利用无线电波(或光波)在空间传播来完成信息传送的一种方式称为无线通信。

其中有线电通信的传输线路有三种主要类型,即架空明线、对称电缆和同轴电缆。

架空明线:我国的架空明线数量较大,至今仍担任繁重的通信任务,但从发展的观点看,将被逐步淘汰。在现代通信中,它已不能承担主干线路的任务。主要因为架空明线开通电路总数有限,电路数增加,传送的频率更高,衰减增加更多,消除线间串音更困难,而传送的频率进入无线电波长波波段,长波的干扰比较严重。此外架空明线易腐蚀受损。它的电气特性易随天气变化而改变。

对称电缆:一条对称电缆包含多对相互绝缘的电话线(又称芯线)。根据芯线结构不同,又可分为低频对称电缆和高频对称电缆。其中低频对称电缆的每对芯线扭在一起,而高频对称电缆的芯线则每两对构成一个四线组,每对占正方形的一个对角线位置,目的在于消除串音。由于高频对称电缆均采用来去两条电缆,所以投资大,而且衰减随着频率升高而增加,频率再提高,串音将更大。我国高频对称电缆用得较多的是一个四线组、四个四线组与七个四线组三种。其中四个四线组共8对芯线,每对芯线可开通60路载波电话(也有120路的),共可开通480路电话,比架空明线增加一倍左右。由于对称电缆存在上述缺点,所以自从同轴电缆出现后,它就逐渐退居到次要地位了。

同轴电缆:同轴电缆中含有许多同轴管,每一根同轴管相当于架空明线 and 对称电缆

中的一对线。一条同轴电缆中有好多根同轴管，有四根、八根，也有十至二十多根者。每两对同轴管(一去一来)，最多可以开通10800~13200路电话电路。同轴电缆也可用来传送电视信号。同轴电缆衰减小，抗外界干扰能力强，能克服“串音”问题。所以目前同轴电缆是有线电通信的重要传输媒介。我国已建成的京、沪、杭同轴电缆线路，可传送1800路电话，也可传送电视。这条线路是用综合中同轴电缆。它是一种既有同轴管又有对称线对的电缆，统称为综合同轴电缆。其中同轴电缆多用在长途干线上，在同轴电缆中附有一些对称线对，以满足沿途较小市镇的通信需要。中同轴管的铜线外径与铜管内径为2.6/9.5mm，小同轴管为1.2/4.4mm。同轴电缆将来可能大部分为光缆代替。

电通信的另一种就是无线电通信。从19世纪后期至今发展惊人，通信距离可达亿万公里，可传送多种信息，一条线路可同时传送几十路电视、几万路以至更多路数的电话。它的发展过程是提高通信可靠性和通信速率的过程。主要是不断扩展使用频率范围，到目前为止已基本掌握长波至厘米波的有关理论和技术问题。目前正在研究毫米波、亚毫米波等通信方式。另外是不断寻找新的传输方式，如利用卫星作为中继站的卫星通信方式，其容量大，距离远、稳定可靠，目前已取代大部分国际短波通信业务。在地下或海底通信中采用超长波。在军事上很有价值。毫米波的表面波及波导传输正在试验研究中。近年来出现的光通信，其惊人的先进性、优越性，将成为有效而实用的通信方式。

目前常用的无线电通信主要是短波通信、微波卫星通信和微波接力通信以及散射通信。

从应用角度出发，目前我国陆地上以同轴电缆和微波接力通信为主，而国际上通信以卫星通信和海底同轴电缆通信为主。

现代化的通信则要求将各种通信手段组成综合数字通信网(IDN)，要求各种通信信号均变换为数字信号，再经过数字传输和数字交换，实现全国各地、世界各地以至宇宙空间的网通信，以期未来实现综合业务数字网(ISDN)通信。

1.2 光纤通信概述

1.2.1 光纤通信的发展史

按广义解释光通信，历史是很悠久的。在光通信“研究”史之前，就已存在某种意义上的光通信“实用”史了。下面简单回顾一下光纤问世前的光通信研究史，以了解光纤通信产生的背景。

第一阶段：目视阶段，这是人类历史上最初期的远距离通信。最古老的目视通信是用“烽火”报警，在我国，数千年前的汉武帝，首先采用烽火接力通信，长城上每隔五公里设一烽火台，烽火逐台传下去，向远地报警。火光通信在抗日战争、解放战争等现代战争中也常使用，如各种颜色的信号弹指挥作战。交通信号灯也是用不同色光表示不同信息的光通信。1871年法国夏布(Chappe)发明扬旗式通信机如图1.1所示，数公里设置一高塔，高塔上装置三块活动木板，顺次将不同的木块组合传至对方。随着拿破仑驰骋欧洲，扬旗式通信传至西欧全境。1835年莫尔斯(Morse)电报的发明，光通信历史完成它的使命，莫尔斯以后至今的历史不再是光通信的历史，而是光通信的研究史了。

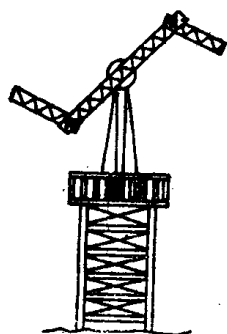


图1.1 夏布发明的扬旗式通信机

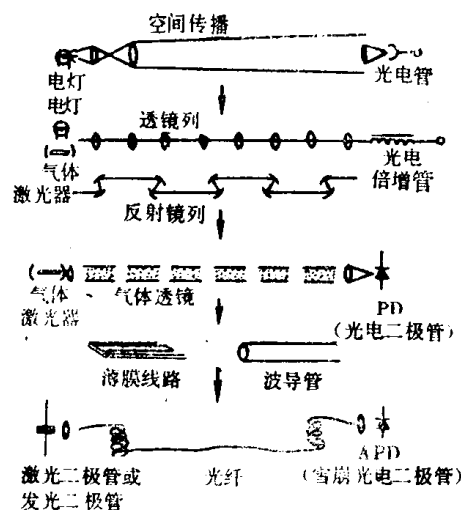


图1.2 光通信的发展

第二阶段：光电方式，第二次世界大战前后，研究了用抛物面镜会聚光信号，再以光电管转换为电信号的光通信方式，如图1.2所示。

第三阶段：传光线路的探索，20世纪六十年代初氦氟激光器进入实用阶段，许多研究人员从微波研究转向光通信研究。传光线路探索包括透镜列波导、反射镜列波导、气体透镜波导、薄膜式光波导、空心式光波导等，如图1.2所示。

第四阶段：光学纤维问世，1970年美国康宁公司Kapron等人发表了 20dB/km 的光纤，作为第三、第四阶段分界点。光纤通信与同轴电缆、微波、毫米波和超导体线路等传输方式相比，已被普遍承认，它已发展成占压倒优势的传输方式了。

1.2.2 光纤通信分类

光通信的分类法与电通信相似，也分为无线光通信和有线光通信两类。无线光通信是大气传输，就是把发送的光信号直接经过大气空间传送到接收端。这种方法不需敷设线路，简单经济，具有无线电微波通信相同的优点，而且能量更集中，保密性更好。但大气激光通信发展不快，其原因是激光通过稠密的大气层，受到大气的吸收、散射等影响，有时遇雨、雪、雾等气候变化，影响激光在大气中传播，通信距离受到很大的限制，严重时使信号中断。为了解决上述问题，一般采用受大气影响小的激光波段，称为“大气窗口”。但不能彻底克服气候条件的影响。目前激光通信在近距离的机动、保密专线通信方面有一定的实用价值。将来在宇宙通信发展到一定条件时，由于大气深空间几乎是真空，没有大气的影 响，不吸收光能，空间又出现较多的宇宙飞船与通信卫星，激光通信将大有发展前途。

目前激光通信一般采用二氧化碳激光器，它的波长为 $10.6\mu\text{m}$ ，在接收端用液氮冷却的光检测器，用光外差接收以减少噪声，提高信噪比，但通信距离仍受到限制。

有线光通信就是七十年代问世的光纤通信。发、收采用半导体光源器件和光检测器件，传输介质是光纤，又称光导纤维或光波导。

1.2.3 光纤通信在电磁波谱图中的位置

与无线电通信用的无线电波相似，光也作为一种电磁波，只是它的波长比无线电波的波长短得多，或者说，它的频率比无线电波的频率高得多。电磁波的波谱图如图1.3所示。由图可见，人眼能直接看到的光，即可见光，波长 $\lambda = 390 \sim 760 \text{nm}$ 。人眼看不见的光，称为红外线，对应波长 $\lambda = 0.76 \sim 300 \mu\text{m}$ 。一般红外线区又分为近红外区($\lambda = 0.76 \sim 15 \mu\text{m}$)、中红外区($\lambda = 15 \sim 25 \mu\text{m}$)、远红外区($\lambda = 25 \sim 300 \mu\text{m}$)。较紫光波长更短的光($\lambda < 0.39 \mu\text{m}$)。人眼也看不见，叫做紫外线，对应的波长为 $0.39 \sim 6 \text{nm}$ 。图1.3画出二氧化

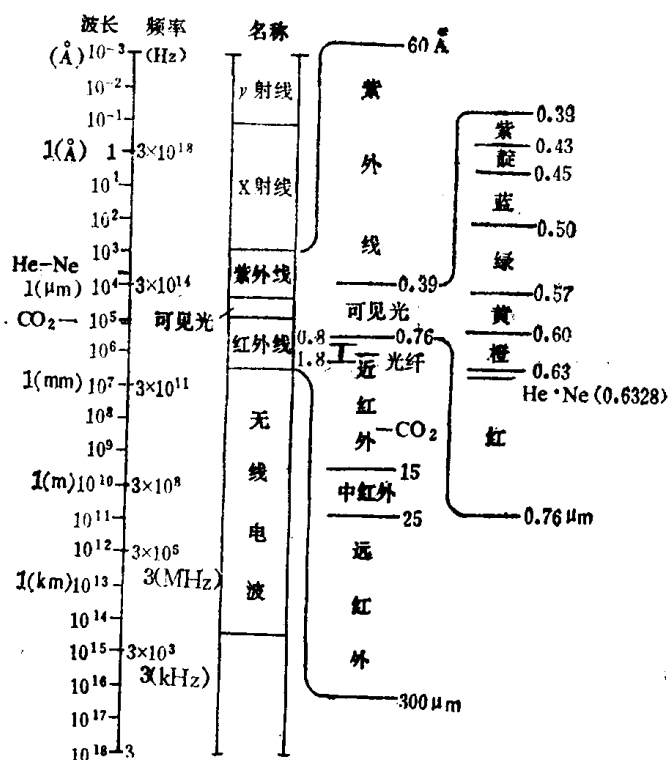


图1.3 电磁波谱(根据对数表作成)

(注: $1 \text{Å} = 0.1 \text{nm}$)

碳激光器及氦氖激光器所对应的波长位置，分别为 $10.6 \mu\text{m}$ 和 $0.6328 \mu\text{m}$ 。显然可见光边上有氦氖激光器(又称红光可见光激光器)。而二氧化碳激光器波长对应的区域则处在近红外区内。有线光通信即光纤通信对应的波长范围 $\lambda = 0.8 \sim 1.8 \mu\text{m}$ 。亦如图1.3所示，它属于电磁波谱中的近红外区。

图1.3中也表示有与波谱图相对应的频谱图。光波与其他波长的电磁波相同，在真空中的传播速度约为 $3 \times 10^8 \text{m/s}$ ，根据波长 λ 、频率 f 和波速 c 之间关系式 $f = c/\lambda$ ，可计算出各种波长对应的频率。光纤通信的 $\lambda = 0.8 \sim 1.8 \mu\text{m}$ ，可计算出对应的 $f = c/\lambda = 167 \sim 375 \text{THz}$ 。

1.2.4 光纤通信的主要组成方框图

光纤通信系统如图1.4所示。发端首先将用户传送的话音变为电信号，然后使半导体激光器或发光二极管等光源发出的光强度跟随电信号的强弱变化(称为光强度调制)，并利用光纤把该光信号传向远方；收端则采用光电检测器接收光信号，经光电转换还原为电信号，最后再解调为接收端用户能理解的话音信号，这样就构成一个完整的模拟光纤通信系统。

很显然，图1.4所示的光纤通信系统不仅能传输电话信号，而且能传输由彩色摄像

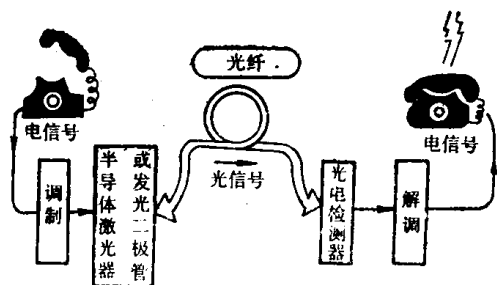


图1.4 光纤通信系统

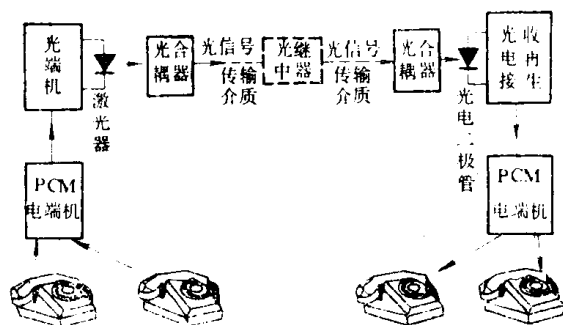


图1.5 PCM多路电话光纤系统

头或录象机等电端机送来的彩色电视信号(包括伴音信号)。亦可将各种模拟信号(如电话信号等)通过脉码调制端机(PCM)进行编码,然后送入光端机,经过放大等处理,再经半导体激光器光强度调制,转换为光信号,经光耦合器送入光纤,传输至远方,如图1.5所示。从光纤传来的光信号在收端经光耦合器应用半导体光电检测器变换为电信号,由PCM电端机译码解调还原为话音信号,最后送入各电话终端。

为了传输更长的距离,在电缆通信系统的中间常设置增音站,同理在光纤通信系统中间还可装置光中继器。目前数字光纤通信系统的中继器一般包括三部分:光电检测器、判决再生器、光源。

光纤通信系统的主要组成部分是光源、光检测器以及有关的电端机和电信号处理设备。

1.2.5 光纤通信的特点

在各种光通信方式中,光纤通信是目前最能充分发挥光的特点的一种方式。它有下列优点:

(1) 传输频带宽,通信容量大。目前使用的光频频率比微波高 $10^3 \sim 10^4$ 倍,通信容量约可增加 $10^3 \sim 10^4$ 倍。例如:一根光纤,当传输码速约为1Gb/s,则在8分钟内可传输5000本书的内容。在PCM光纤数字传输系统中,每一路电话的数字信号的码速为64kb/s。如采用时分多路复用(TDM)30路电话(称为基群)的数字信号,其码速为2.048Mb/s,约为2Mb/s。4个基群,即120路,码速为8.448Mb/s,约为8.5Mb/s,称为二次群。4个二次群,即480路,其码速为34.368Mb/s,约为34Mb/s,称为三次群。4个三次群,即1920路,其码速为139.264Mb/s,约139Mb/s,称为四次群。按此规律递升即为更高次群。当传输码速为1Gb/s时,就可以传输12000路电话。美国贝尔实验室曾在新泽西州的荷姆德尔分所,在掺锗的 SiO_2 单模光纤上,以波长为 $1.28\mu\text{m}$ 的光源,在760m长的线路上,作了传输速率为200Gb/s的试验,传输容量相当于200万路的电话。在今天,人们常为打电话遇到占线而苦恼,预计在不久的将来,光纤通信将成为世界现代通信的主要传输工具之一,到那时即使全世界的人在同一时间用同一条线路通话,也不会占线,其通信容量之大为微波通信所望尘莫及。

(2) 中继距离远。国内外许多试验线段的试验表明,光纤通信无中继的直通距离可比金属导线的远得多。一般说,光缆的无中继通信距离比同轴电缆的大三倍以上,因此

更适用于大容量、远距离的干线通信及海底通信系统。由于视频信号在普通市内电话线传输，将要求每隔数百米加一中继站，限制了可视电话发展。如采用光纤作为可视电话传输线，将不需要那样多的中继站，所以国内外已广泛采用光纤作为可视电话传输线。一般说，如使用损耗为 5dB/km 以下的短波长的光纤传输，传输 10km 可不需设立中继站，而 10×100 路载波电话或 400Mb/s 数字通信的中同轴电缆则每隔 1.6km 须设立增音站或中继站。如采用长波长光纤传输，传输距离可达 50km。长波长单模光纤在使用新的调制和接收技术时，中继站间隔可能增加到 200km。

(3) 抗电磁干扰能力强，无串话。光纤是非金属的光导纤维，即使工作在强电磁场附近或处于核爆炸后强大电磁干扰的环境中，光纤也不会产生感应电压、电流。这样可避免危害性大又最难去掉的电磁干扰。而金属导线、电缆必须有笨重和昂贵的屏蔽措施，且又不能有效排除电磁波干扰，所以光纤通信在核战争条件下有很高的使用价值。由于光信息限制在光纤内传输，不会逸出光纤，所以光缆的光纤之间不会“串话”，即没有纤间串扰，不易被窃听。即使光纤的外保护层有小孔、裂缝而进水或受潮，也不会影响光的传递，但进水和受潮对金属导线意味着接地和短路。光纤系统亦不存在发生火花的安全危险，安全性好。

(4) 光纤细，光缆轻。光纤直径一般只有几微米~几十微米，制成光缆后直径较电缆细，重量较电缆轻。据报导，国外已制成直径 28mm 的光缆，其中共包含 1512 根光纤。由于光纤细，光缆轻，运输架设方便。则在战争中将可减轻后勤保障的负担，在野战中则可使用直升飞机快速架设光缆线路。

(5) 资源丰富。光纤的纤芯和包层的主要原料是二氧化硅，资源丰富而便宜，取之不尽，而电缆所需的铜、铝矿产则是有限的，采用光纤后可节省大量的铜材。

(6) 均衡容易。在运用频带内，光纤对每一频率成分的损耗几乎是相等的，一般不需在中继站和接收端采取幅度均衡措施。如要求均衡措施，一般也较容易达到要求。

由于光纤通信具有上述优点，故目前仍在继续对它进行研究，以便进一步改善其性能。目前需进一步研究的问题较多，例如：

- (1) 折射率分布的最终采取形式；
- (2) 传输损耗可降低的程度；
- (3) 最低损耗的波长；
- (4) 带宽能力的限度；
- (5) 由于弯曲等外界物理因素所引起的特性变化；
- (6) 老化等化学因素引起的特性变化；
- (7) 成缆和光缆连接的技术问题；
- (8) 长途中继站供电、数字信号单极性及其它有关问题的研究。

我们相信，随着光纤通信的不断发展，通过开展深入的研究工作，这些问题将会逐步得到解决。

1.2.6 光纤通信的广泛应用

由于光纤通信和电通信相比有许多明显优点，所以光纤通信很快为人们所重视，并得到广泛应用。光纤通信在市内电话和长途电话以及海底通信系统中；在电力、铁路、

煤矿、输油输气管路的通信和控制系统中；在飞机、轮船、导弹内部的信息传送系统中；在电视广播、交通运输、钢铁厂、大楼内通信系统中；在计算机及其局部网中都可以应用。

光纤在军事上有更加重要的应用：

(1) 在陆军野战部队中应用。目前部队需要使用现代化的通信设备，如保密通信(如电话)、数字电话、高速传真、计算机通信、多路复用设备等，在上述现代通信设备中，尤其在司令部内外通信业务中，更希望应用光纤通信。如美国军用战术网点通信系统为AN/TTC-39，各通信车箱间均采用光缆联接，交换机至用户也使用光缆，这可减轻传输线重量，改善后勤保障的条件。光缆的体积和重量分别为电缆的1/10和1/14，而中继距离还可达电缆的20倍。

(2) 在水下军事装备中应用。对于携带核弹头的核潜艇更加重要，在舰艇内部如美国的小石城号旗舰、小鹰号航空母舰等均已广泛应用了光纤通信系统。

(3) 在飞行器上的应用。例如在美国A-7 航空机中，导弹、武器系统与航空电子设备的联系原来使用的300条金属线时，十分拥挤，维修困难，采用光纤后，只需13条光纤，光纤和连接器重量减少到14kg。

(4) 在地面数据系统中应用。如司令部与基地间电话、视频数据系统、计算机互连等均使用光纤。欧洲的机动雷达过去均使用电缆传输数据，雷达与控制中心之间相距121m，控制中心易受敌方攻击。若采用微波系统，则每个系统重量将为4544kg，采用光纤后，雷达站与控制中心可相距1km以上，终端机只重19.5kg，加固的305m光缆重量仅14.5kg，而使用121m的电缆重量达545.4kg。

(5) 我国部分军用雷达站也开始使用光纤。此外在地下系统的测试线路中光纤也被采用。例如美国地下核试验的“黄金屋”光纤系统能在1ms时间内将核爆炸的各种测试信号传至地面测试器，且每公里长的光缆重量仅96.5kg，是电缆重量的1/53。

还应看到，计算机及其网络更是光纤潜在的最大用户。随着计算机向高速、大容量、多功能、高效率以及资源共享发展，计算机组网更加迫切。但随着计算机容量扩大，密度愈来愈高，电缆的固有缺点显得非常严重，甚至使工程无法进行。例如当计算机速率达到4Gb/s时，一个大型计算机集合体内的电缆连线达700kg长，相互干扰严重，且体积也占整个系统设备的1/3。光纤计算机网尤其是光纤局部网在国内外已广泛开展研究工作并投入使用。我们曾应用自行研制的通用型光纤数字传输系统在国内的PDP11/34A、PDP11小型机、DJS-131、DJS-033、DJS-053、王安机、IBM-PC/XT等多种机型的计算机网或局部网中作了反复试验，证明光纤是计算机网中的理想传输介质。光纤不仅在计算机网络中得到应用，而且在计算机数据母线、计算机与外设之间、办公室内文字处理等业务处理设备间及计算机内连接等方面均可得到有效地采用。预计不久的将来，光纤应用会越来越广泛。

1.2.7 光纤通信的展望

追溯光纤通信技术的发展史，展望未来，光纤通信的发展可大致划为三个阶段：

第一阶段为1980年以前，这一阶段使用的系统可认为是第一代光纤通信系统。所使用的光波长 $\lambda = 0.8 \sim 0.9 \mu\text{m}$ ，属于短波长范围，光纤采用阶跃折射率分布的光纤(SI)和渐

变折射率分布的光纤(GI),均为多模光纤,主要采用多模GI分布光纤,光纤直径约50 μm ,光纤损耗减至5dB/km。光源采用铝镓砷(AlGaAs)的LED(发光管)和LD(激光管),光检测器用硅(Si)的PIN(光电二极管)和APD(雪崩光电二极管),光端机采用分立器件,传输距离或中继站间隔约10km,码速容量在500Mb/s以下。

第二阶段为1980~1990年期间。第二代光纤通信系统光波长 $\lambda = 1.2 \sim 1.6 \mu\text{m}$,属长波长范围,采用单模SI分布光纤,纤芯直径小于10 μm ,光纤损耗减至1dB/km以下,色散(即光到达接收端的时延差,也即脉冲展宽)极小。光源采用铟镓砷磷/铟磷(即InGaAsP/InP)的发光管LED或激光管LD,光检测器用铟镓砷/铟磷(即InGaAs/InP)的光电检测器PIN和砷化镓的FET(场效应管)组件的前置低噪声放大器。传输距离或中继站距离至少为20km,可达到200km。码速容量可达1Gb/s以上。开始采用波分复用(即WDM)方式,将应用集成光路(IOC)并逐步普遍采用,中继器亦将由光放大所代替。

第三阶段预计在1990年以后,第三代光纤通信系统将完全跳过“光-电”转换,直接实现“光-光”、“声-光”之间变换、放大、多路化等处理,到那时计算速率极高的“光计算机”将诞生,将使通信系统出现新的时代。

复 习 题

1. 写出下列简略符号在光纤通信中的英文全名,并解释其中文含义。

PCM, FDM, TDM, WDM, A/D, E/O, SI, GI, Mb/s, Gb/s, dB/km, S/N, IOC, THz, GHz。

2. 画出微波与光波的电磁频谱和电磁波谱,用频率和波长两种刻度,标明光纤通信与激光通信使用波长、频率在电磁波谱、电磁频谱上的位置。

3. 简述光纤通信的优越性。当前技术上的限制因素是什么?光纤通信的简史分为哪几个阶段?光纤通信的发展趋向是什么?当前处于光纤通信系统的哪一代?

4. 略述光纤通信已在那些场合开始应用?近几年将会在那些场合发展应用?

第二章 光纤与光缆

2.1 光纤分类

要了解光纤传光原理及其传输特性,首先需要知道光纤的分类。

根据光信号在光纤中的传输特性,光纤可分为单模和多模两种。光在光纤介质中传播,它的电磁场在光纤中将按一定的方式分布,这种分布方式称之为模式。单模光纤是指只允许一种电磁场分布方式存在的光纤。多模光纤是指允许多种电磁场分布方式同时存在的光纤。单模光纤直径很小,一般在 $5\mu\text{m}$ 以下。光在单模光纤中的传光原理可用电磁波理论即模式理论来解释。目前比较成熟的是多模光纤。这种光纤的芯径比较大,约在 $50\sim 80\mu\text{m}$ 。在多模光纤中的传光原理一般用射线光学理论即射线理论来解释。为了更完整而全面地解释光纤传光原理,有时应用射线理论和模式理论结合起来解释。

多模光纤在结构上可以分为两大类。一类是均匀-阶跃折射率分布型,简称阶跃折射率光纤,如图2.1(a)所示。它由内外两层折射率不同的石英材料(SiO_2)组成,纤芯的折射率 n_1 比包层的折射率 n_2 大。另一类是渐变折射率分布型,也称梯度折射率光纤,如图2.1(b)所示,由图可知,纤芯轴心的折射率最大,沿半径方向折射率逐渐减小,到了与包层的交界面上,折射率与包层相等。因为SI分布的传光原理比较容易解释,因此不论用射线理论或模式理论均先以SI分布为例,以后再对GI分布进行解释。

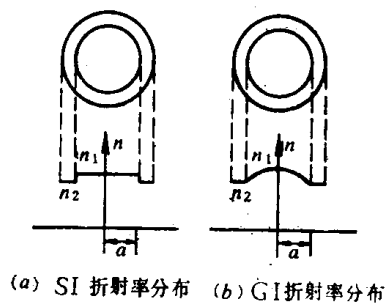


图2.1 光纤的折射率分布

2.2 光的折射与反射现象

光可作为一种电磁波,严格描述其运动过程,必须应用麦克斯韦方程。采用麦克斯韦方程推导出波动方程后即可严格地描述光强和相位。由于光波的波长很短,如果仍从麦克斯韦方程出发,采用波长近似趋向零的几何光学原理或射线方程,把光波看作“射线”,即用射线理论来描述,将较直观、方便,虽然是近似的方法,但易于理解传光原理。

下面考虑光在折射率不同的两种介质界面上的折射与反射。折射与反射现象是射线理论中,用来简洁地说明传光原理的方便工具。下面说明一下。

任一介质的折射率 n ,是光在空气中的速率 c 与在该介质中的速率 v 之比,即

$$n = c/v \quad (2.1)$$

光线经过两个不同介质的界面时,要发生折射和反射现象,如图2.2(a)所示。一束光从折射率为 n_1 的介质I左上方射向界面,一部分光线将透过界面进入折射率为 n_2 的介质II中,即为折射;另一部分光线则在界面上反射回来。根据斯奈尔(Snell)定律,其

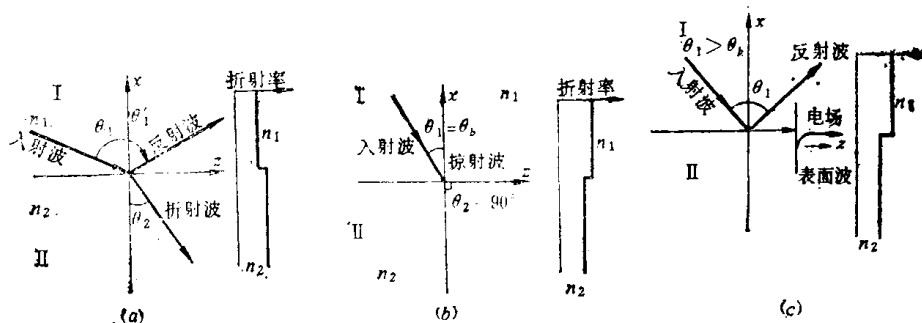


图2.2 光的折射与反射

(a) 折射〔表示 $\theta_1=60^\circ$, $n_1=1$ (空气), 并相对于 $n_2=1.5$ (玻璃)时的折射波〕; (b) 掠射〔表示 $n_1=1$, $n_2=1.5$ 时的临界角〕; (c) 全反射〔表示 $n_2=1$, $n_1=1.5$ 时入射角 $\theta_1 > \theta_k$ (临界角)〕

光线与界面垂直线(即法线)所成的入射角 θ_1 与折射角 θ_2 之间的关系是

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \quad (\text{折射定律}) \quad (2.2)$$

而 $\theta_1 = \theta'_1$ (反射定律) (2.3)

现在假设 $n_1 < n_2$, 根据折射定律, 则有

$$\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{n_2}{n_1} \quad (2.4)$$

显然 $\theta_1 > \theta_2$ 。

其次, 考虑图2.2(b)中 $n_1 > n_2$ 的情况, 根据折射定律, 显然, $\theta_1 < \theta_2$ 。现在将折射角 θ_2 逐渐增大, 即当入射角 θ_1 小到一定程度时, θ_2 就变为 90° 。此时光不再进入介质 II 中, 而在界面掠射, 对应的入射角为 $\theta_1 = \theta_k$ 。

根据折射定律, 则

$$\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{\sin \theta_k}{\sin 90^\circ} = \sin \theta_k = \frac{n_2}{n_1} \quad (2.5)$$

即 $\theta_k = \sin^{-1}\left(\frac{n_2}{n_1}\right)$, θ_k 称为临界入射角, 简称临界角。

当 $\theta_1 > \theta_k$ 时, 如图2.2(c)所示。光线从介质 I 射入界面时, 不再进入介质 II 中, 光能量全部被反射, 即从界面返回至介质 I 中, 这称为全反射。因此, 希望光线在介质 I 内发生全反射, 就要求入射角 $\theta_1 > \theta_k$ 。 θ_k 又称为全反射的临界角。若以具体数值为例, 当 $n_2=1$ 时, 对于 $n_1=1.5$ 和 3.5 , θ_k 分别为 41.8° 和 16.6° 。当 $\theta_1 > \theta_k$ 时, 如上所述, 光线不再进入图2.2(c)中的下方(x 轴的负方向)。

2.3 光纤传光原理

现在利用平面介质波导来研究光纤的传光原理。利用上述射线理论的全反射概念来解释光纤的传光原理, 比较直观, 易于理解。

在光纤纤芯中存在折射率较高的部分, 在 SI 分布的光纤中, 一般纤芯折射率 $n_1=1.5$, 包层的折射率 n_2 稍小于 n_1 , 这是使射线在纤芯与包层的交界面产生全反射, 并形成光闭锁在光纤纤芯内部向前传播的必要条件。纤芯与包层的相对折射率差

$$\Delta = \frac{n_1^2 - n_2^2}{2n_1} \approx \frac{n_1 - n_2}{n_1} \quad (2.6)$$

例如, $\Delta = 0.01$ 即 1%。显然, 若已知 n_1 , 则 $n_2 = n_1(1 - \Delta) = 0.99n_1$, 一般 $n_1 = 1.5$, 则 $n_2 = 1.485$ 。

光纤是一种介质波导。为了说明光纤传光原理, 我们将三维圆柱形光波导变换为相应的二维平面波, 如图 2.3 所示。二维波导在 y 方向上是均匀的, 考虑这种二维波导, 不仅易于理解其物理意义和便于进行数学分析, 而且只需使用一定的关系就可以方便地求解圆柱形光波导的特性, 因此有其普遍性。由于平面波导的概念易于推广到圆柱形波导, 因此即以平面波导为主来说明波导的结构及其传光原理。一般不论波导结构如何, 由它引导的电磁波是在此周围空间内传播, 但在大于一定距离的外侧空间中, 电磁场将按指数规律衰减, 这种电磁波称表面波。

一般光纤是由石英纤芯和石英包层两层组成。外加塑料护套。纤芯直径约 $50 \sim 60 \mu\text{m}$, 包层直径为 $100 \sim 125 \mu\text{m}$, 如图 2.4 所示。当光线射入光纤端面时, 为了使光线向前传播, 希望光线在纤芯和包层的界面上能向内实现全反射。

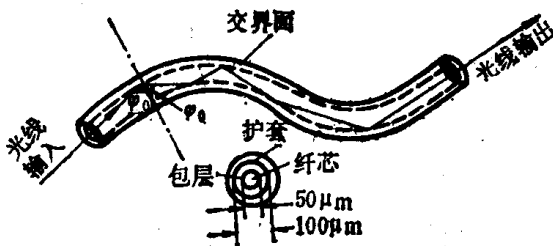


图2.4 光在光纤里的传输示意图

如图 2.5 中的光线①、②、③。

光线①以比较大的入射角 θ_0 (即光线与光纤端面法线之夹角) 射至光纤端面时, 因为 $n_0 < n_1$, 所以光线在纤芯内产生折射, 其折射角 (光纤与端面法线之夹角) 为 θ , 根据斯奈尔定律可得:

$n_0 \sin \theta_0 = n_1 \sin \theta$, 因为 $n_0 = 1$, 所以 $\sin \theta_0 = n_1 \sin \theta$, 又因为 $n_1 > n_0$, 所以 $\theta < \theta_0$ 。

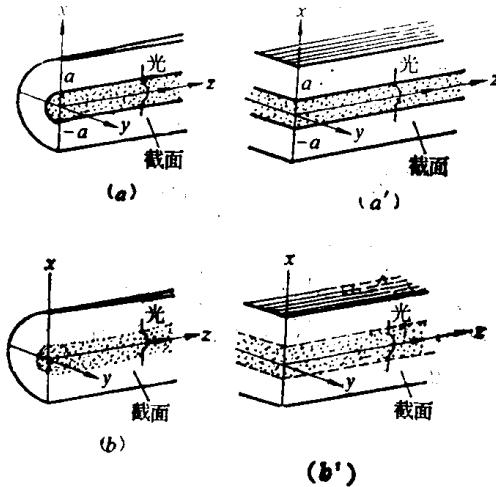


图2.3 圆柱光纤和平面波导

(a) 阶跃型圆柱光纤及其截面

(a') y 方向均匀一致的平面波导

(b) 渐变型圆柱光纤及其截面

(b') y 方向均匀一致的渐变型平面波导

为使光线在光纤纤芯内得到全内反射, 首先解释光线在SI折射率分布的光纤中向前传播的现象。如图 2.5 所示。设光纤端面外介质的折射率为 n_0 (现假设波导外侧为空气, 即 $n_0 = 1$), 纤芯和包层折射率分别为 n_1 和 n_2 (现设 $n_1 = 1.5$, $n_2 = 1.485$)。

在图 2.5 中, 光线从空气射入光纤端面时可以有三种情况,