

Optical Communication technique

张 煦等编译

上海科学技术出版社

光纤通信技术

张煦等编译

上海科

社



光纤通信技术

光纤通信技术

张 煦 等编译

上海科学技术出版社

内 容 提 要

光纤通信与电缆通信、微波中继通信相比,具有传输容量大、损耗低、抗干扰能力强以及安装、维修简单等特点,预计在不久的将来,光纤通信与卫星通信一起将成为现代通信的主要传输方式。

全书共分十章,内容包括:光纤通信技术综述;光纤传输线;光纤、光缆设计;光纤连接器;激光管和发光管;光纤通信发送机与接收机;光电检测器;光纤通信系统举例和集成光学原理简述等。

本书内容翔实、资料丰富、叙述深入浅出、举例典型,可作为大专院校光纤通信课程的教材或参考书,亦可供工厂、企业和研究所从事光纤通信的工程技术人员参考。

封面设计 卜允台

光 纤 通 信 技 术

张 煦 等 编 译

上海科学技术出版社出版

(上海瑞金二路450号)

新华书店上海发行所发行 无锡县人民印刷厂印刷

开本 787×1092 1/16 印张 14.5 字数 339,000

1985年6月第1版 1985年6月第1次印刷

印数: 1—5,800

统一书号: 15119·2385 定价: 3.00元

前 言

光纤通信技术是现代有线通信技术的发展方向。对于广泛使用的通信系统和计算机通信将产生十分深刻的影响。光纤通信与电缆通信、微波中继通信相比,具有抗电磁干扰能力强、传输损耗低、中继站间隔长、传输数字信号码速容量大以及安装、维修简单等特点。预计在不久的将来,光纤通信和卫星通信一起,将成为现代通信的主要传输工具。

大约 1978 年起,国内开始全面展开光纤通信技术的研究和开发工作,几年来,我国在光纤通信建设上,也已取得一定成绩,现在北京、上海、武汉等地都已经有了成缆的光纤模拟电视和数字系统。为了推广这方面的应用,上海交通大学和上海冶金研究所的同志们编译了这本“光纤通信技术”。本书共分十章,两章是自编的,八章是翻译的,其中五章内容摘自 Kressel 主编的“光纤通信的半导体器件”(Semiconductor Devices for Optical Communication),三章内容选自英国“无线电和电子工程师”(Radio and Electronic Engineers) 1981 年 7~8 月专辑。

本书编译分工如下:第一章由张煦编;第二章由俞槐铨译自 W. A. Gambling 等著的 Optical fiber transmission lines;第三章由王端骧编;第四章由曹介元译自 P. Mossman 著的 Connectors for Optical fiber Systems;第五章由水海龙译自 H. Kressel 等著的 Laser diodes and LEDs for Fiber Optical Communication;第六章由唐棣芳译自 P. W. Shumate Jr. 等著的 Lightwave Transmitters;第七章由逢永秀译自 D. P. Schinke 等著的 Photo-detectors;第八章由陈建铭、陆自南译自 R. G. Smith 和 S. D. Personick 合著的 Receiver Design for Optical fiber Communication Systems;第九章由俞槐铨译自 J. H. Mullins 著的 An Illustrative Optical Communication System;第十章由阚家溪译自 P. J. R. Layburn 和 Lamb 合著的 Integrated Optics, a Tutorial Review。

最后由张煦和王端骧同志整理和统校。限于编译者水平,书中缺点与错误难免,希望读者批评指正。

作 者

目 录

前 言

第一章 光纤通信技术综述	1
1.1 电通信和光通信	1
1.2 光纤传输特性	3
1.3 光源和光检测器件	8
1.4 光纤通信系统	15
1.5 光纤通信的三类应用	20
1.6 八十年代展望	25
参考文献	33
第二章 光纤传输线	35
2.1 引言	35
2.2 光纤制作	36
2.3 光在单模光纤中的传播	38
2.4 光在多模光纤中的传播	44
参考文献	48
第三章 光纤、光缆设计	50
3.1 光纤直径	50
3.2 包层的厚度问题	52
3.3 纤芯与包层的折射率差 Δ	55
3.4 微弯曲的损耗	58
3.5 不同用途光纤的设计	59
3.6 光缆设计	62
3.7 单模光纤设计的新发展	65
参考文献	67
第四章 光纤连接器	68
4.1 引言	68
4.2 对准的问题	68
4.3 端接问题	69
4.4 可靠性	70
4.5 安全	70
4.6 现用工艺	70
4.7 鉴定方法	73
参考文献	74
第五章 激光管和发光管	76
5.1 异质结材料	77
5.2 双异质结二极管	79
5.3 器件的制作	83

5.4	激光管特性	86
5.5	发光二极管	91
5.6	二极管的可靠性	100
	符号表	104
	参考文献	105
第六章	光纤通信发送机	108
6.1	特性	108
6.2	调制方式	111
6.3	光源的比较	113
6.4	数字驱动电路	114
6.5	发光管驱动器	114
6.6	激光管驱动器	120
6.7	模拟驱动电路	124
6.8	分系统问题	127
	符号表	129
	参考文献	130
第七章	光电检测器	133
7.1	简单光电二极管	133
7.2	雪崩光电二极管	135
7.3	制造工艺	141
7.4	长波长光电二极管	141
	符号表	144
	参考文献	145
第八章	光纤通信接收机	148
8.1	引言	148
8.2	基本接收机	148
8.3	场效应管和双极晶体管放大器的噪声	161
8.4	前端放大器设计	167
8.5	数字接收机的灵敏度	172
8.6	发送机和信道参数对系统性能的影响	179
8.7	模拟系统	182
8.8	尚待进行的工作	184
	符号表	185
	参考文献	188
第九章	光纤通信系统举例	190
9.1	背景和目的	190
9.2	数字局间线路	192
9.3	光纤实验工程和系统组成	193
9.4	系统的构形和安装	198
9.5	性能和结果	201
	参考文献	202
第十章	集成光学原理简述	204
10.1	引言	204

10.2 光传播的基本原理.....	204
10.3 平面波导间的耦合.....	206
10.4 矩形波导.....	209
10.5 集成光学工艺和材料.....	210
10.6 器件作为集成光学的元件.....	213
10.7 半导体在集成光学中的应用.....	220
10.8 结论.....	221
参考文献.....	221

第一章 光纤通信技术综述

1.1 电通信和光通信

1.1.1 电通信

电通信分有线电和无线电通信两类。有线电通信利用明线、对称电缆和同轴电缆,提供陆地通信和海底通信。对于中、长距离传输,它们都装上不同路数的载波电话,明线载波电话有 3 路,12 路;对称电缆载波电话有 60 路。有线电通信技术中较先进的是同轴电缆载波电话,按其尺寸大小,可分为两种:小同轴载波电话有 300 路、960 路、2700 路,中同轴可传输 1800 路,国际上很多采用 10800 路,个别达到 13200 路,这是频分多路复用(FDM)的最高峰。

现在无线电通信主要是微波接力通信和微波卫星通信两种。微波接力系统由若干接力站延长传输距离,组成中、长距离微波线路。它们都用载波电话,许多路电话频带由单边带排列成群后,先对中频例如 70MHz 进行宽带调频,然后升为微波射频,送往天线。由于一条微波线路有几个微波射频,所以总的电话路数容量很大。

卫星通信是以人造卫星作为中继站转发微波,在两个或多个地面站之间进行通信,包括电话、电视和数据。卫星通信的服务地区很广,在同步轨道上以相等间隔分布三个卫星,可构成全球通信网。由此,卫星通信现在已成为国际通信的主要工具,并且扩充应用至国内远距离通信,有极其旺盛的生命力。

无论有线电通信还是无线电通信,按照传输信号可分为模拟通信和数字通信两类。模拟通信的特点是将讲话声音转换成电信号,电信号的变化规律与声音类似,故称模拟。普通电话和频分多路复用(FDM)的载波电话都属于模拟通信一类。由于电信号随距离增加而减弱,每隔一段距离必须装置增音机以放大电信号。增音机数加多时,噪声和干扰将累积,这是模拟通信的缺点。为此,进一步发展了数字通信技术。电话信号经过模拟至数字的变换后,变成了只有 1、0 两种状态的脉冲信号,称为数字信号。当传输距离延长时,数字信号需要再生中继机,它只要求辨别有或没有脉冲,所以它的抗干扰能力强,而且,当中继机数加多时,噪声和干扰并不累积,每一中继机的作用是再生,这使数字通信具有显著的优越性。电话信号变换至数字信号的方法,现在采用脉冲编码调制(PCM),每一路电话的数字信号的码速为 64 kb/s。如采用时分多路复用(TDM)30 路电话的数字信号,其码速约 2 Mb/s,4 个 30 路(即 120 路),其码速约 8.5 Mb/s,4 个 120 路(即 480 路),其码速约 34 Mb/s,如此递升。同轴电缆可以传输 PCM 数字信号多至 400~500 Mb/s。不论电话,还是电视,当它们经过模-数变换后,就变得和数据一样的数字信号,可以混同传输,这是数字通信的又一显著的优越性。

从应用的角度来看,目前陆地同轴电缆和微波接力系统是国内长途通信网的主要的传输方式;而卫星通信和海底同轴电缆则是国际通信的主要工具。无线电通信主要依靠微波,波长正在逐步缩短,从厘米波 4GHz 扩充至 20GHz,接近毫米波。模拟通信逐渐向数字通信过渡,就是说,FDM 逐渐由 PCM 代替。各种通信信号最终都先变成数字信号,于是经

过数字传输和数字交换,通信网成为综合服务数字网(ISDN)。

1.1.2 光通信

通信技术进展的一个明显特征是电磁波谱逐渐被更充分地发掘利用。无线电波从微波扩充至毫米波,现在又从无线电波延伸至红外区的光波。或者说,通信频率越来越高,从兆赫(MHz)升至千兆赫(GHz)、兆兆赫(THz)。这样,电通信扩充至光通信。光通信如工作在近红外区,波长 $1\mu\text{m}$,即相当于频率 300THz ,如工作在波长 $10\mu\text{m}$,相当于频率 30THz 。我们讲电通信时,习惯于使用频率,单位为

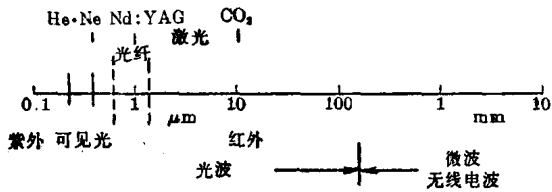


图 1.1 电磁波谱的红外段

MHz 和 GHz,而当我们讲光通信时,则使用波长较方便,单位为 μm 。图 1.1 示出了电磁波谱的红外区一段,它显示无线电微波至光波的过渡。

光通信的划分与电通信相同,也分为无线光通信和有线光通信两类。无线光通信是指收发两端相隔可视距离,发送端设置二氧化碳气体激光器,发出一定功率、带有信息的光波,波长 $10.6\mu\text{m}$,接收端设置相应的光检测器,中间媒介为大气,这种光通信就属于无线光通信,常称大气光通信。由于大气吸收光能,传输随气候变化,这种大气光通信不十分可靠,通信距离不能延伸。只有在深空间,那里几乎是真空,不吸收光能,无线光通信才非常有效。所以,无线光通信的发展前途主要是在空间通信,而不是在陆地通信。

在陆地和海底能够适合实用的光通信,将考虑另一方式。发、收两端分别设置半导体光源器件和光检测器件,传输媒介是玻璃纤维,即光纤,由若干对光纤组合成为光缆,传输途径中间设置中继站,可以展延通信距离。光的波长在 $1\mu\text{m}$ 附近。这是有线光通信,称为光纤通信。在七十年代,由于光纤工艺大大改进,光纤传输损耗降至 10dB/km 以下,又由于半导体光器件和激光技术的迅猛发展,这种光纤通信的现实意义已被肯定。

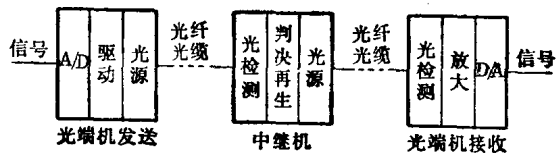


图 1.2 光纤通信系统

光纤通信系统的基本方框图,如图 1.2 所示,它包括两个终端站和一个中继站,由光纤组成的光缆作为线路。每一终端站各有光端机,其中发送设备主要是光源及其驱动,把电信号电流变换为光信号功率,即电/光转换;接收设备主要是光检测器和放大,把光信号功率变换为电信号电流,即光/电转换;中继站则既包含光检测器,又包含光源,把接收的光信号变换为电信号,经过判决再生的电处理,又把电信号变换为光信号发送。简言之,光纤通信系统的主要组成部分是光纤和光器件,而光器件就是光源和光检测器件。和光系统一起装置运用的 A/D、D/A、判决再生等电信号处理器件和电路,则与目前电信系统中所用的相同。

光纤通信系统可以用于模拟通信,也可以用于数字通信,但主要大量的应用将在数字通信方面。电视的模拟信号可以对光源直接调制,产生的光信号通过光纤通信系统传输至对方,但这样的实际应用仅限于短距离电视传输,完成对称电缆所不能担任的任务。由于数字通信的传输性能比模拟通信优越,而且光纤通信系统传输频带宽度的能力大,能够适应市内的、长途的、低码速的和高码速的数字通信。由此,模拟信号一般先经过数字化过程再传输。

在光端机的发送设备之前,有模/数(A/D)变换或编码设备,在接收设备之后有数/模(D/A)变换或解码设备。例如电话模拟信号要先在发送端经过取样、量化和编码过程,编成 PCM 信号,再对光源进行调制,经光纤传输,在接收端解调为 PCM 信号,经解码和重建过程,最后恢复模拟信号。如传输距离长,就需要在适当间隔设置中继机,其中有判决、再生、定时、锁相等设备。

光纤通信系统如用于模拟通信,主要的性能质量指标是信噪比和谐波畸变;如用于数字通信,主要的质量指标是误码率,如传输距离长,中继机数多,则另一重要质量指标是相位抖动,这些指标基本上与电信系统一样。

光纤通信系统与电信系统比较,有许多明显的优点:

(1) 由于光波的频率高,可供利用的频带很宽,能够容纳大容量通信,尤其适合于高速率数字通信的需要。而未来的通信将是综合服务数字通信网 ISDN,光纤通信可以充分发挥作用。

(2) 目前广泛使用的短波长光纤,损耗已减至 5dB/km 以下,传输 10km 不需设立中继站,而 10800 路载波电话或 400 Mb/s 数字通信的中同轴电缆每隔 1.6km 须设立增音站或中继站。如光纤使用长波长,传输距离可达 50km。将来长波长单模光纤使用 PSK 或 FSK,又使用外差相干接收,光纤通信的中继站间隔可以延长至约 200km。

(3) 在运用频带内,光纤对每一频率的损耗几乎是相等的,不需在中继站和接收端采取幅度均衡措施。

(4) 每根光纤在纤芯和包层以外各有塑料护套,纤芯内传播的光基本上不会向外辐射,同一光缆中邻近各根光纤之间几乎没有串扰,在光缆外面很难加以窃听。

(5) 光纤通信不受电磁干扰、静电干扰、或人为干扰的影响,这对电气铁道和电力线附近的通信极为有利。每一方向的信号传输,是由光沿一根光纤上传播,类似于微波波导管,没有大地回路,因而不受大地电流或电位差的影响。光纤系统没有发生火花的危险,所以在有爆炸可能性的场合使用光纤通信可以保证安全。

(6) 玻璃纤维的原料丰富而便宜,取之不竭,而电缆所需的铜、铅矿产则是有限的,供应是紧张的。由光纤制成的光缆,比电缆尺寸小而重量轻,并且比较容易敷设。

光纤通信系统的特点及其优越效果,如表 1.1 所示。

表 1.1

系 统 特 点	优 越 效 果
低传输损耗 大带宽能力 光缆尺寸小、重量轻 不受电磁干扰 没有感应和辐射	中继站间隔距离长,线路设备成本降低 数字通信码速高,信息容量大 空间效率高,处理便易 适用于强电环境和多电台地区 没有纤间串扰,不易被窃听

1.2 光纤传输特性

1.2.1 射线传播

为了了解光是怎样在光纤中传播的,人们利用了射线理论和模式理论。射线理论是利

用光学的反射、折射和散射等现象来解释光在纤芯中的传播机理。模式理论是从无线电微波波导技术演变的,因为光波属于电磁波,而光纤可以说是一种介质波导,所以可方便地利用电磁场分布来解释光波在光纤中传播是属于导波范畴。



图 1.3 光纤结构

我们先用射线理论来解释。光从一个媒质到另一媒质,在界面上会发生反射和折射现象,如图 1.4 所示。光纤是由圆柱形玻璃纤芯(直径约 $50\mu\text{m}$)、玻璃包层(外直径约 $125\mu\text{m}$)、和塑料护套组成。光就在纤芯与包层的界面发生全反射,使它局限于纤芯的内部向前传播。据光学原理,任一媒质的折射率 n 为:

$n = c/v$, 其中 c 为光在空气中的速率; v 为在该媒质中的速率。空气的折射率为 $n_0 = 1$, 玻璃的折射率为 $n_1 = 1.5$ 。光纤的必要条件是纤芯的折射率 n_1 必须略大于包层的折射率 n_2 。相对折射率差 $\Delta = \frac{n_1 - n_2}{n_1}$, 一般采用

的 Δ 远小于 1, 例如 $\Delta = 0.01$, 纤芯 $n_1 = 1.5$, 包层 $n_2 = 1.485$ 。现在假设折射率 n_1 在纤芯中是均匀分布的, 到了包层的界面, 折射率阶跃似地降低至 n_2 。这样的折射率分布称为阶跃式, 简写 SI。

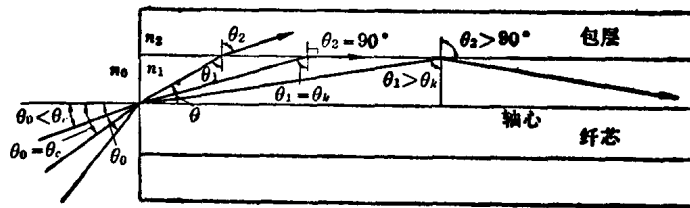


图 1.4 在光纤中的射线

参照图 1.4, 当光从空气进入光纤时, 由于空气和光纤的折射率不同, 光将改变方向, 这称为折射。据折射定律知道, 当光从折射率小的媒质(n_0)进入到折射率大的媒质(n_1)时, 入射角将大于折射角, 即 $\theta_0 > \theta$, 这是因为 $n_0 \sin \theta_0 = n_1 \sin \theta$ 。同理, 当光的射线从纤芯射至包层的界面时, 因 $n_1 > n_2$, $n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$, 故 $\theta_1 < \theta_2$ 。当 $\theta_2 = 90^\circ$ 时, 光将不进入包层, 而在界面掠射。这时, θ_1 成为临界角 θ_c , 得 $n_1 \sin \theta_c = n_2 \sin 90^\circ$, 即 $\sin \theta_c = n_2/n_1$ 。当光从纤芯入射于包层界面的角 θ_1 大于这临界角 θ_c 时, 光将从界面返回至纤芯, 成为全内反射。这时, 纤芯与包层的界面好象抛光的金属面一样, 光纤中导波传播就是要射线在包层界面发生全反射。只有当光从空气入射于光纤的角小于某一临界角 θ_c , 使 $\theta_1 > \theta_c$ 时, 才可能发生全反射而成为导波向前传播。若光从空气入射于光纤的角大于 θ_c , 射线将进入包层, 不再是有益的传播。这个入射临界角 θ_c 很重要:

$$\sin \theta_c = n_1 \sin(90^\circ - \theta_c) = n_1 \cos \theta_c = n_1 \sqrt{1 - (n_2/n_1)^2} = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = n_1 \sqrt{2\Delta}$$

这个临界角称为接受角, 即接受光圆锥的半角, 它的正弦称为数值孔径 NA 。一般 θ_c 很小, 故 NA 近似地等于临界角 θ_c 本身, 即:

$$NA = n_1 \sqrt{2\Delta} = \sin \theta_c \approx \theta_c$$

如 $n_1 = 1.5$, $\Delta = 0.01$, 则 $NA = 0.2$, $\theta_c = 12^\circ$ 。数值孔径是光纤的一个重要参数, 用来计量光纤接受光的特性, 它主要取决于纤芯与包层的相对折射率差 Δ 。

这样沿纤芯由界面全内反射穿过轴心而向前传播的射线, 称为子午射线。只要光入射于纤芯的角小于 θ_c , 不同入射角将有不同路程的子午射线。这种有多射线传播的光纤, 就是常称的多模光纤。每一射线的路程长度 l , 到达接收端的时延为 $t = l/v$ 。在阶跃式折射率分布的光纤, 纤芯内光的传播速率 v 是均匀的, 它等于 c/n_1 , 所以 $t = (n_1/c)l$ 。由此可见, 时延与射线长度成正比。当光垂直入射于纤芯时, 射线沿轴心传播的路程长度最短, 它等于

光纤长度: $l_{min} = l_{轴心} = L$ 。当入射角等于临界角 θ_c 时, 射线长度最长: $l_{max} = L/\sin \theta_c$ 。最长射线与最短射线的时延差为最大时延差。每公里光纤长度的时延差为:

$$\tau_s = \frac{l_{max} - l_{min}}{L} = \frac{n_1}{c} \left(\frac{1}{\sin \theta_c} - 1 \right) = \frac{n_1 \Delta}{c} = \frac{(NA)^2}{2n_1 c}$$

在上述数值例子, 每公里光纤的最大时延差为 50 ns/km。如发送端发出一个窄脉冲, 接收端将收到多个窄脉冲合成一个宽脉冲。其最晚到达与最早到达的时延差 τ_s 就是脉冲展宽, 如图 1.5 所示。这种脉冲展宽现象, 称为光纤的模间色散。根据脉冲展宽的大小, 可以计算光纤能够传输的频带宽度: $B = \frac{1}{2\tau}$ 。在这例子, 带宽能力为 10MHz·km。从

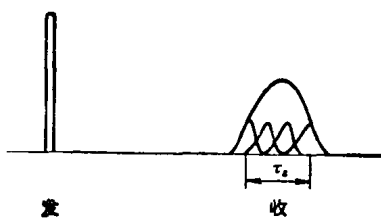


图 1.5 脉冲展宽

而可看出, 阶跃式折射率分布的多模光纤有不足之处, 即模间色散大, 脉冲展宽大, 能够传输的带宽小。

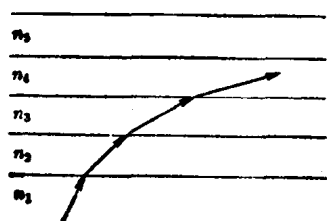


图 1.6 不同折射率层中的射线

现在, 假设纤芯由许多同轴的均匀层构成, 它们从里至外每一层的折射率越来越小, 即 $n_1 > n_2 > n_3 > n_4 > n_5$, 如图 1-6 所示。图中 n_1 为轴心的折射率, n_5 为靠近包层的一层折射率。就是说, 射线的折射率从中心起沿径向连续地逐渐变小, 直至纤芯与包层相等, 这称为渐变式折射率分布, 简称为 GI。在这样的分布情况下, 纤芯内每一均匀层以内的射线是直线, 但各层射线方向越来越朝向轴心弯折。如纤芯不是分成若干均匀层, 而是按照下式规律沿径向连续减小, 直至包层界面。

$$n(r) = \begin{cases} n_1 \left[1 - 2\Delta \left(\frac{r}{a} \right)^\alpha \right]^{1/2} & r < a \\ n_2 & r > a \end{cases}$$

如 $\alpha = 2$, 则

$$n(r) = \begin{cases} n_1 \left[1 - \left(\frac{r}{a} \right)^2 \Delta \right] & r < a \\ n_1 (1 - \Delta) & r > a \end{cases}$$

这种渐变分布成为抛物线规律。于是, 纤芯内射线将是连续弯曲曲线, 不难求得射线轨迹方程,

$$r(z) = A \sin\left(\frac{\sqrt{2\Delta}}{a} z\right) + B \cos\left(\frac{\sqrt{2\Delta}}{a} z\right)$$

可见, 射线路程穿过轴心, 好象正弦波振荡, 沿轴心方向 z 传播。图 1.7(b) 示出了渐变式折射率分布和正弦波射线路程。不同幅度的正弦波却有相同的周期, 所以也称自聚焦。

在这种正弦波形的弯曲射线轨迹, 正弦幅度大的射线相应于较长的路程长度, 但幅度大的那部分轨迹离轴心较远, 折射率较小, 因而传播速率较快。就是说, 较长的轨迹有较快的速率, 较短的轨迹有较慢的速率, 结果是

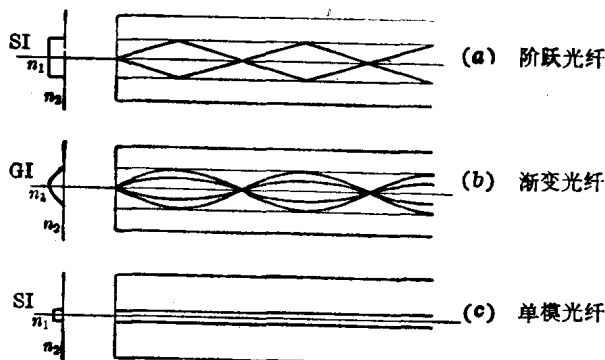


图 1.7 光纤中的射线

所有不同长度的轨迹到达接收端的时延几乎相同,许多射线相加,脉冲展宽必然较小,色散较小,传输带宽能力较大。所以,在多模光纤中,渐变折射率分布优于阶跃折射率分布,因为渐变式的色散小,脉冲展宽小,传输带宽能力大。渐变式的脉冲展宽仅为阶跃式的 $\Delta/8$ 倍,在前述例子,渐变式 $\tau_G = 0.06 \text{ ns/km}$ 。这是目前多模光纤大多采用渐变折射率分布的原因。

上述光纤的纤芯直径为 $50 \mu\text{m}$, 而传播光的波长在 $1 \mu\text{m}$ 左右,纤芯直径为波长的几十倍,光纤中传播许多射线,所以称为多模光纤。如光纤的纤芯直径缩细至 $5 \mu\text{m}$, 仅几倍于光的波长,则纤芯中传播的射线只有一种与轴心近于平行的射线,如图 1.7(c)所示,这种情形相当于单模光纤。既然是单一模式,那就没有象多模光纤那样的模间色散,脉冲展宽很小,传输带宽能力很大。虽因纤芯直径细,制作工艺较困难,但长距离、大容量的通信线路,将来势必采用单模光纤。

1.2.2 模式分布

当我们研究微波波导管的传播特性时,采用模式理论,我们把每一种电磁场分布形式称为模式。那时,最重要的模式是横电模 TE_{mn} 和横磁模 TM_{mn} 。所谓横电模,是指电场仅存在于横截面的分布形式,沿轴心方向没有电场, $E_z = 0$ 。 TE_{mn} 的注脚 mn 分别表示 θ 方向的变化周数和 r 方向的变化周数。 TE_{01} 表示 E 在 θ 方向没有变化,在 r 方向变化一周。

微波矩形波导的主模为 TE_{10} , 圆波导管的主模为 TE_{11} 。圆波导管有截止波长,其值决定于波导截面的尺寸。比截止波长更短的某一微波波长,其主模的衰耗最小。因此,圆波导管可以用于微波通信,传输一定距离。同轴电缆中传播的模式为横电磁模,即 TEM , 电场和磁场都仅出现于横截面,沿轴心方向既无电场, $E_z = 0$, 又无磁场, $H_z = 0$ 。 TEM 波的传播频率没有下限,衰耗随频率上升而加大,这是各种传输线的普遍特征,与波导有显著区别。

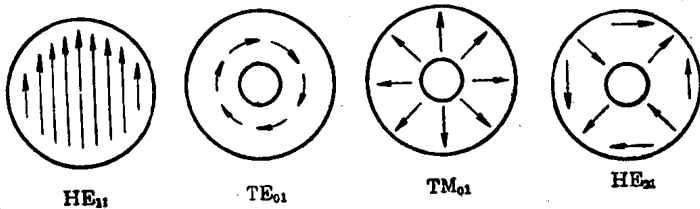


图 1.8 光纤中不同的模

现在光纤属于波导范畴,它不同于传输线,而与微波的波导管相似,但它的主模既非 TE , 又非 TM , 而是两者混合,称为 HE_{11} , 横截面中电场沿 θ 方向变化一周,沿 r 方向也变化一周。光

纤波导的低阶模为 TE_{01} , TM_{01} , HE_{21} , 还有其它高阶模。图 1.8 示出这几种重要模式在横截面的电场分布。可见,主模 HE_{11} 是线偏振的,所以它有时又写成 LP_{01} 。低阶模 TE_{01} 和 TM_{01} 的电场与角度无关,在径向是对称的。当光入射于光纤一端时,另一端可以摄取光斑图,光功率是与电场强度平方成正比。这种光斑显示的光强图型,是与电场分布对应。 HE_{11} 主模的光斑,是光强均匀的圆斑,只不过中心部分最亮,边缘渐渐变暗。低阶模 TE_{01} , TM_{01} , HE_{21} 的光斑都将在中心小圆以内出现暗区。

从模式理论得知,光纤传播有一个特征参数:

$$V = \frac{2\pi a}{\lambda} \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = \frac{2\pi a}{\lambda} n_1 \sqrt{2\Delta} = \frac{2\pi a}{\lambda} (\text{NA}) = \frac{\omega a}{c} (\text{NA})$$

它也称归一化频率。例如,纤芯直径 $2a = 60 \mu\text{m}$, 波长 $\lambda = 1 \mu\text{m}$, 纤芯折射率 $n_1 = 1.5$, 相对折射率差 $\Delta = 0.01$, 可根据上式计算得 $V = 40$ 。这种光纤属于多模光纤。从 V 可以计算光

纤中传播的模式总数。如光纤的折射率分布是阶跃式(SI), 则 $N = V^2/2$ 。在这例子, $N = 800$, 就是说, 光纤中传播的不同模式, 多至 800 种。如折射率分布是渐变式(GI), 则 $N = V^2/4$, 模式总数有 400 种。只有 $V \leq 2.4$, 除了主模以外所有的模都被截止, 这就形成单模光纤。

图 1.9 示出阶跃式折射率分布的归一化传播常数 β/k 与归一化频率 V 的关系曲线, 每一种模式有一条曲线。此图证实了 $V = 2.4$ 使低阶模 $TE_{01}, TM_{01}, HE_{21}$ 都被截止, 只有主模 HE_{11} 通过, 主模是没有截止波长的。 V 式很重要, 特别在 V 和 λ 固定的条件下, 它表示 a 与 Δ 的关系。如光纤没有玻璃包层, 纤芯外面就是空气, 则 $n_2 = 1$, Δ 不小, 按照 V 式, a 必须极小, 才使 V 减至小于 2.4。纤径过小, 对实际制造很不利。所以, 玻璃包层是必需的, $n_2 = 1.485$, Δ 很小, a 就不必太小。 Δ 越小, a 就可以稍大, 这才有实际意义。例如 $V = 2.4$ 时, $\Delta = 0.01$, 求得 $2a = 3.7 \mu\text{m}$, $\Delta = 0.001$ 求得 $2a = 12 \mu\text{m}$ 。稍大的纤径容易制造和连接。

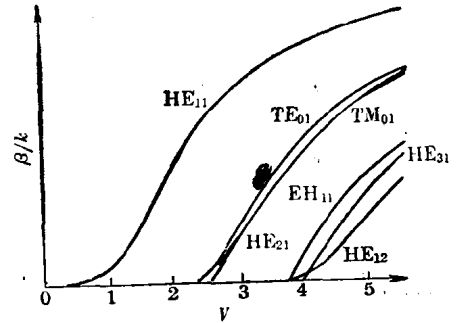


图 1.9 阶跃光纤中不同模的 V 对 β/k 的关系

在纤芯与包层界面受导的模式是最合需要的, 它使纤芯传播的光功率大, 包层的光功率小。在截止波长附近, 大部分光功率存在包层内, 纤芯中光功率被截止。由此, 如波长大于截止波长, 受导的模式使传播有用。不受导的模式使光功率分散在包层内, 遇到缺陷, 就可能变成辐射而消失。还有泄漏的模式, 对传播毫无用处。当结构有缺陷时, 例如纤径大小不一, 光纤弯曲或随机微弯, 界面不规则, 或存在散射中心, 都将引起模式转换, 即一种模的能量耦合至其它模, 结果使传播加大损耗。

光源激励对传播光功率有密切关系。如 $V > 3$, 几乎 90% 的入射光功率耦合至 HE_{11} 模, 10% 形成其它模。如激励光纤的光源是高斯束, 光束大小与纤芯符合, 垂直入射, 则耦合效率最好。平面波的光向纤芯入射, 激励效率较差, 且几乎产生多种模式。入射如有小量倾斜, 对主模 HE_{11} 的激励效率影响不大。光入射纤芯的角对产生哪种模式有关系。一般是较小的入射角产生低阶模, 较大的入射角产生高阶模。高阶模往往比低阶模有较大的传播损耗。

1.2.3 损耗-波谱曲线

光纤的主要光特性有两项, 即: 损耗和色散。

光沿光纤传输, 随着距离的延长, 功率越来越减弱。这就是说, 光纤是有损耗的。光纤损耗的大小, 用每公里分贝数表示, 即 dB/km 。光纤损耗可分为吸收损耗和散射损耗两种。当玻璃中金属杂质和氢氧根含量减得极少时, 吸收损耗就大大降低。

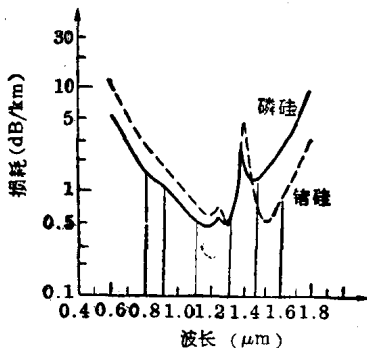


图 1.10 光纤的损耗波谱

图 1.10 示出了光纤损耗频谱曲线。从图中可知, 在光波长 $0.8 \sim 0.9 \mu\text{m}$ 范围内, 光纤损耗约在 $1 \sim 2 \text{dB/km}$ 间, 而在光波长 $1.1 \sim 1.3 \mu\text{m}$ 范围内, 光纤损耗约在 $0.5 \sim 1.0 \text{dB/km}$ 间。在这些波长范围, 出现两个有用的低损耗波段。前一波段称为短波长, 以 $0.85 \mu\text{m}$ 为中心, 是目前广泛用于实际光纤通信的波段。后一波段称为长波长, 以 $1.3 \mu\text{m}$

为中心,其损耗明显地比短波长的更低,是近年发现和正在大量试验的波段。

从图中还看出,0.6~1.0 μm 范围的倾斜部分是由于瑞利散射引起的,很难克服。这也表明,在长距离的光纤应用,短波长不如长波长优越。在波长1.0 μm 以上,1.4 μm 附近出现的高峰是由于OH吸收引起的。1.4 μm 以上的损耗曲线可以由光纤材料和掺杂的调整而得到改进。例如图中实线为磷硅系,即以 $\text{P}_2\text{O}_5\cdot\text{SiO}_2$ 为纤芯, $\text{B}_2\text{O}_3\cdot\text{SiO}_2$ 为包层;如改用锗硅系,即以 $\text{GeO}_2\cdot\text{SiO}_2$ 为纤芯,纯 SiO_2 为包层(图中虚线),损耗可大大降低。如在制造工艺上进一步采取措施,降低OH含量,将改善光纤的长波长损耗特性。它具有很宽的传输窗孔,有可能实现波长划分多群复用WDM,更加增大光纤传输容量。

1.2.4 模间和模内色散

光脉冲沿光纤传输,脉冲宽度将会随着距离的延长而越来越展宽。引起的原因,是光纤具有色散特性。光纤的色散有模间色散(也称模式色散)和模内色散(主要是材料色散)两种。在多模光纤,不同模式有不同的传播路程,因而到达接收端的时延不同,使原来的脉冲到达接收端时展得较宽,这就是模式色散,可以利用渐变折射率分布来减小或基本上克服。

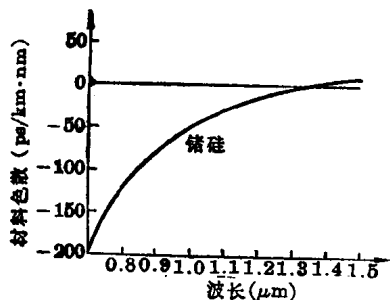


图 1.11 锗硅光纤的材料色散

单模光纤没有模式色散。但光纤材料本身对不同的波长有不同的折射率,因而有不同的传播速率,到达接收端有不同的时延,引起脉冲展宽,这是材料色散。玻璃纤维的材料色散是较小的。如图 1.11 示,锗硅系光纤在多数光波长的材料色散约几十 ps/km·nm,它依赖于光源的波谱宽度 nm。从图上看,材料色散由负值变至正值,这是因为材料色散与 $dn/d\lambda$ 有关, $dn/d\lambda$ 可能是负,也可能是正。值得注意的是,在 1.3 μm 附近的波长,材料色散为零,这个波长对色散而言是很有用的。

模内色散除了材料色散外,还有波导色散,它总是正的,数值也小。在波长 1.3 μm 处,正的波导色散恰与负的材料色散相抵消。此时波长的模内色散为零。在单模光纤,既没有模间色散,而在 1.3 μm 波长又没有模内色散,且零色散的波长正好与低损耗的光波长相符合,这是极有利的情况。单模光纤兼有低损耗和低色散双重的优点,所以最适宜于长距离和大容量的通信。反过来说,按照目前的技术发展趋向,可以断言,长距离和大容量通信必须利用 1.1~1.6 μm 的长波长范围,才能充分发挥光纤的潜在优越性。

当光源有较宽的波谱时,材料色散 ps/km·nm 将加大。多模光纤用了渐变式折射率分布,模间色散减得很小。但如光源采用发光二极管,波谱较宽,材料色散就变为主要。在光波长 1.3 μm ,材料色散近于零,渐变式折射率分布的多模光纤仍能用于中等距离和中等容量的通信。

1.3 光源和光检测器件

1.3.1 光子和辐射

光呈现量子结构,且包含离散的能量束,它们就称为光子。我们讲解光纤通信系统中光源器件和光检测器件的原理时,必须利用光子的概念。

每个光子的能量可从普朗克定律求得，

$$E = h\nu \quad (\text{joule 或 } W \cdot s)$$

其中 h 是普朗克常数， $h = 6.625 \cdot 10^{-34} (\text{j} \cdot \text{s})$ ， ν 是频率(Hz)。这能量的单位又常用电子伏(eV)表示，即电子行经电位差 1V 所得到的能量， $1\text{eV} = 1.602 \cdot 10^{-19} \text{j}$ 。如波长 $\lambda = 3\mu\text{m}$ ，则频率 $\nu = 10^{14} \text{Hz}$ ，能量 $E = 0.4\text{eV}$ 。当 $\lambda = 1.24\mu\text{m}$ 时， $E = 1\text{eV}$ 。光子能量乘以每秒接收的光子数，就是光功率(W)。上面说光子能量与频率成正比，到了光频率几百兆兆赫，光子就有显著能量，例如 100THz 的光子具有能量 0.4eV，每秒只需几个光子，就有足够的功率使检测器件起作用。所以，光通信系统计算时需要利用光子的概念。

自从激光的光源开始广泛应用以来，计量采用辐射计学。

点光源向所有方向每单位时间发出的总能量，就是辐射通量或辐射功率，其表示式为：

$$\left. \begin{aligned} P &= \frac{dE}{dt}, \\ \Phi &= \frac{dE}{dt} \end{aligned} \right\} \text{单位为 j/s, W, 或 dBm}$$

表 1.2

名 词	单 位
辐射能量	j (焦)
辐射通量	} W (瓦)
辐射功率	
辐射强度	W/sr (瓦/球面度)
面辐射强度	W/sr/m ² (瓦/球面度/光源面平方米)
辐照度	W/m ² (瓦/观测面平方米)

辐射强度是每单位立体角的辐射功率。立体角 Ω 是沿需要的方向一个圆锥射在圆球面上的面积 s 除以圆球半径的平方(平面角 θ 则是在圆周上的弧 l 除以圆的半径 R)。如平面角 θ 很小，则立体角与平面角的关系可以近似为：

$$\Omega = 2\pi \left(1 - \cos \frac{\theta}{2}\right) \approx \pi \left(\frac{\theta}{2}\right)^2$$

平面角 θ 的单位为弧度，立体角 Ω 的单位为球面度，sr。所以辐射强度为：

$$I = \frac{dP}{d\Omega} \quad (\text{W/sr})$$

如光源不是点光源而有一定的面积 dA ，如图 1.12(b)所示，则垂直于观测方向每单位光源面积的辐射强度为：

$$L = \frac{dI}{dA \cdot \cos \phi} \quad (\text{W/sr/m}^2)$$

它依赖于观测的角度，但与光源离观测者的距离无关。最后，辐射计学还有一个量，叫做辐照度，它是入射于每单位观测面积的光功率，单位是 W/m^2 。因辐射功率就是辐射通量，故辐照度也即辐射通量密度。在实际应用上，辐照度这个量很少使用。表 1.2 列出了辐射计学各种计量单位的名称。

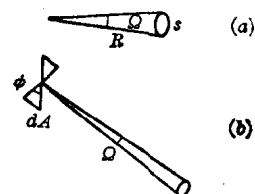


图 1.12 立体角
(a) 点光源；(b) 面光源

1.3.2 光源器件

要实现光通信,除了光纤外,发送端需要光源器件,把电信号变换为光信号,接收端需要光检测器件,把光信号变换为电信号。光源器件只有发光二极管(LED)和激光二极管(LD)两种形式。通信用的光检测器件也只有光电二极管(PIN)和雪崩光电二极管(APD)两种形式。表 1.3 列出了四种器件使用波长范围。

表 1.3

		短 波 长 0.8~0.9 μm	长 波 长 1.2~1.6 μm
光 源	LED LD	GaAlAs	InGaAsP
光 检 测	PIN APD	Si	Ge 或 InGaAs 或 InGaAsP

发光管 LED 发出光子是自发辐射,非相干的,并且是荧光。就是说,LED 的发光面上各个不同单元是各不相关的独立辐射体,每一单元发出的光,在时间上或相位上各不相关。LED 发出辐射图型的角度较大,波谱宽度亦较大,约 35 nm。在 0.85 μm 波长,LED 最多能把 100 μW 光功率耦合入 $\Delta = 0.01$ 的多模光纤,驱动电流的调制频率可达 50 MHz,就是说,LED 适合于带宽 50 MHz 以下的信号传输。对于模拟调制,如调制深度为 0.5,总的谐波畸变可在基波以下约 30~40 dB,如适当利用负反馈措施,还可降至基波以下 60~80 dB。

激光管 LD 发出光子是真正激光,是相干辐射。它有四个优越特性:(1)时间和空间的相干性;(2)准直;(3)大的功率密度;(4)稳定的波形。激光管的波谱宽度小于 2nm。它

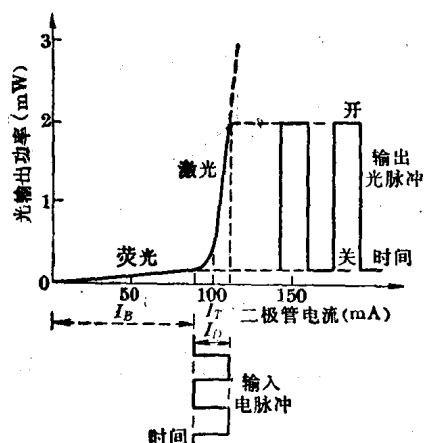


图 1.13 典型激光管的输入电流与输出光功率的关系

最多能把 1 mW 光功率耦合入多模光纤,提供带宽 500 MHz,都比 LED 大一个数量级。激光管产生的正弦光信号中心频率约 10^{14} Hz,带宽只有 10^6 Hz,谱纯度 $\frac{\Delta\nu}{\nu} = 10^{-10}$ 。就是说,激光源是产生超纯和稳定波形的振荡器,其输出的幅度和相位是很稳定的,而且可预测的。功率 1 mW 和谱宽 10^6 Hz 的激光源相应于温度 $7 \cdot 10^{13}$ K 的热光源。

激光管 LD 能够把 1 mW 光功率耦合入多模光纤,提供带宽 500 MHz,比 LED 大一个数量级。激光管发出的波谱宽度小于 2 nm,比 LED 的 35 nm 窄得多。激光管的门限依赖于温度和老化的情况,必须采用反馈以自动控制驱动器,才能确保激光管的输出功率恒定。

这种措施经过实践证明,能够达到要求。光源器件的可靠性或寿命小时数是关键性的指标。目前,LED 和 LD 两种光源器件根据温度加速老化试验证明,它们在室温下连续工作的平均寿命达到或超过 10^6 小时。