

光纤通信技术基础

王延恒 编著



天津大学出版社

光纤通信技术基础

王延恒 编著

9

天津大学出版社

内 容 简 介

本书以通俗的语言比较系统、全面地介绍了光纤通信系统各组成部分的工作原理。全书共七章，内容包括：光纤与光缆、光发射机、光接收机、模拟与数字传输系统、光路无源器件与薄膜波导、光纤通信中的测试技术等。

本书可作为高等院校有关专业的教材，也可供从事光纤通信的科研机构、工厂等单位的科技工作者参考。

光 纤 通 信 技 术 基 础

王延恒 编著

*

天津大学出版社出版

(天津大学内)

河北省邮电印刷厂印刷

新华书店天津发行所发行

*

开本：787×1092毫米 1/16 印张：19 字数：471 千字

1990年10月第一版

1996年7月第三次印刷

印数：6 501-9 500

ISBN 7-5618-0202-1

TN·3 定价：19.00元

前 言

光导纤维、电子计算机和微电子学是目前信息时代电子学领域中迅速发展起来的三大新技术。1970年,美国康宁公司研制出损耗低于20dB/km的光导纤维后,作为新的传输介质的光导纤维,便从理论研究阶段迈进了实用研究阶段。从实用角度看,光导纤维主要应用在三大领域中,即通信领域、非通信领域和大功率传输领域。

在通信应用领域中,由于光导纤维具有损耗低,中继通信距离长;频带宽,通信容量大;抗电磁干扰性、保密性强等优点,因而显示出其强有力的生命力。有人预言,由光纤制成的光缆,将要逐渐取代目前的金属电缆。

光纤在非通信领域中的应用,主要是将光纤作为传感器件,用来对外界压力、温度、位移、速度、电压和电流等物理量进行监测。光纤有能抗电磁干扰、绝缘强度高、体积小、重量轻以及灵敏度高、容量大等优点,所以它不仅应用范围广,而且在某些方面的性能已大大超过传统的传感技术。因此,尽管光纤在这个应用领域中的研究工作始于80年代初,但已显示出广阔的应用前景。为此曾有人作过这样的比拟:如果把光纤技术在通信领域中的应用看成是一朵正在开放的鲜花,那么,光纤技术在非通信领域中的开拓便是一枝含苞待放的花。

在现代信息社会中,在面对新技术革命挑战的时代中,光导纤维及其应用技术所处地位的重要性是显而易见的。因此,作为传授知识的高等学校,责无旁贷地应该把这方面的知识简明扼要而又系统地传授给广大学生和有关技术人员。基于这一目的,我们编写了这本教材。

由于条件、能力和水平的限制,同时又受专业范围的约束,本教材将主要介绍光纤在通信应用领域中的内容,因此定名为《光纤通信技术基础》。光纤在非通信领域中的应用,以及光纤在大功率传输方面的内容,不包括在本教材之内。

本书第二章§2-11、第三章§3-1~§3-4、第四章§4-1~§4-8、第五章§5-11、第六章§6-1~§6-3和第七章§7-1~§7-3由刘淑美同志编写。其它部分由王延恒同志编写并统编全书。在编写过程中,得到天津大学和电子工程系各级领导、天津大学光电子技术教研室王清月教授、南开大学现代光学研究所董孝义副教授、电子工业部第46研究所王玉英工程师和黄秀钦工程师等许多同志的支持与协助,并提出不少宝贵意见。谨在此表示衷心感谢。

由于时间仓促,加之编者理论水平和实践经验有限,不妥或谬误之处在所难免。因此,恳请读者及有关人士批评指正。

编者 一九八六年九月于天津

目 录

第一章 概述	(1)
§ 1-1 光通信的发展概况与前景	(1)
§ 1-2 光纤通信系统的组成	(3)
参考文献.....	(4)
第二章 光纤与光缆	(5)
§ 2-1 光纤的构造	(5)
§ 2-2 光纤的分类	(6)
§ 2-3 光纤制作方法简介	(7)
§ 2-4 光缆	(8)
§ 2-5 光纤的传光原理	(8)
§ 2-6 光纤的光学特性	(11)
§ 2-7 光纤的损耗特性	(12)
§ 2-8 光纤的色散特性	(16)
§ 2-9 光纤的特征方程与单模条件	(23)
§ 2-10 光纤中的场结构与场图	(34)
§ 2-11 单模光纤中的偏振	(41)
习题.....	(53)
参考文献.....	(54)
附录.....	(55)
第三章 光发射机	(59)
§ 3-1 光纤通信系统对光源的一般要求	(59)
§ 3-2 半导体的发光机理	(59)
§ 3-3 半导体激光器(LD)	(63)
§ 3-4 半导体发光二极管(LED).....	(79)
§ 3-5 LED的驱动电路	(84)
§ 3-6 激光器(LD)的驱动与控制电路.....	(88)
§ 3-7 简单实用光发射机举例	(98)
习题.....	(102)
参考文献.....	(103)
第四章 光接收机	(104)
§ 4-1 概述	(104)
§ 4-2 光电效应	(104)
§ 4-3 PIN	(106)
§ 4-4 APD	(107)
§ 4-5 光电检测器的主要技术指标	(109)

§ 4-6	光电检测器与前置放大器的噪声	(114)
§ 4-7	前置放大器晶体管类型的选择	(117)
§ 4-8	前置放大器电路类型的选择	(121)
§ 4-9	模拟光纤传输系统中的信噪比	(126)
§ 4-10	数字光纤传输系统中的误码率	(129)
附录		(136)
§ 4-11	数字光接收机的灵敏度	(143)
§ 4-12	放大器噪声因子 Z 、传输比特速率 B 等因素对数字光接收机灵敏度的影响	(146)
§ 4-13	光接收机的码间干扰、判决电平与动态范围	(155)
§ 4-14	简单实用光接收机举例	(162)
习题		(169)
参考文献		(169)
第五章 光纤通信系统		(171)
§ 5-1	概述	(171)
§ 5-2	模拟通信系统中的调制方式	(171)
§ 5-3	数字通信系统中的码型	(174)
§ 5-4	光纤通信系统中的复用方式	(182)
§ 5-5	光纤通信系统设计 (一) ——系统中功能器件的选择	(187)
§ 5-6	光纤通信系统设计 (二) ——传输函数法计算中继距离	(191)
§ 5-7	光纤通信系统设计 (三) ——传输速率或带宽的检验	(196)
§ 5-8	光纤通信系统中的辅助系统	(202)
§ 5-9	多端口光波分配网络系统	(204)
§ 5-10	中继器	(209)
§ 5-11	光纤通信系统中的外调制方式	(213)
§ 5-12	相干光纤通信系统	(218)
习题		(230)
参考文献		(230)
第六章 光路无源器件和光波导		(232)
§ 6-1	概述	(232)
§ 6-2	光路中的无源器件	(232)
§ 6-3	薄膜波导	(238)
习题		(249)
参考文献		(249)
第七章 测试技术		(251)
§ 7-1	概述	(251)
§ 7-2	光纤几何参数的测量	(251)

§7-3	光纤光学参数的测量	(257)
§7-4	光纤损耗特性的测量	(268)
§7-5	光纤色散或带宽的测量	(275)
§7-6	单模光纤归一化频率的测量	(280)
§7-7	单模光纤拍长的测量	(282)
§7-8	光发射机主要技术指标的测量	(285)
§7-9	光接收机主要技术指标的测量	(286)
§7-10	抖动容限和光端机告警功能的测量.....	(288)
§7-11	发光器件和光电器件主要参数的测量.....	(289)
	附录.....	(292)
	参考文献.....	(293)

第一章 概 述

§ 1-1 光通信的发展概况与前景

一、光通信的发展史

光通信，顾名思义就是利用光进行信息传输的一种通信方式。追溯历史，人类利用光进行信息传输，大致经历了这样三个阶段：

1. 可视通信 我国古代的烽火台、近代战争中的信号弹、抗日战争时期的信号树以及船舰使用的灯塔、灯光信号、旗语等，都属可视光通信信号。

2. 激光大气通信 60年代初，人们利用二氧化碳气体激光器进行激光大气通信试验。由于激光大气通信的传输介质是地球周围的大气层，而大气层又存在着对光的严重吸收、散射作用和受天气变化影响等缺点，使得激光大气通信在通信距离、通信稳定性和可靠性等方面受到严重影响。这样，60年代中期一度振兴的激光大气通信研究处于停滞状态。

3. 光纤通信 利用光导纤维作为光的传输介质的研究工作，经历了一段艰辛的道路。早在1950年，就有人对光在光纤中的传输问题开始了理论研究工作。1951年发明了医学用光导纤维。但是，那时由于光纤的损耗太大，研究工作进展不大。1966年，英籍华人高锟(K.C.Kao)博士揭示了实现低损耗光纤的可能性，使光纤通信的研究工作又获得了生机。1970年，可以说是光纤通信史上划时代的一年。这一年，美国康宁公司研制出损耗为20dB/km的光纤，使光纤进行远距离传输成为可能。自此以后，光纤通信的研究工作获得了长足的进步。有人把光纤通信的发展过程，划分为三个阶段：1966~1976年为研究开发阶段。这期间，1972~1973年，损耗为2dB/km的光纤问世，使光纤通信变为现实；1977~1986年为实用化阶段。这期间许多国家（包括我国在内）相继建成多条现场试验线路和商用线路，使用的工作波长为短波长0.85 μ m和长波长1.3 μ m。与此同时，光纤的损耗进一步降低，达到0.5dB/km(1.3 μ m)和0.2dB/km(1.55 μ m)的水平；1986年以后为大规模光纤通信线路建设阶段。以下数字可以说明光纤通信事业的发展趋向。1980年世界光纤通信市场销售额为1.5亿美元，1981年为3.5亿美元，1982年达5.2亿美元。据预测，1990年市场需求量将达65亿美元，本世纪末将达400亿美元。

二、先进国家光纤通信概况

从1970年到现在，光纤通信事业发展很快。尤其从70年代末以来更是突飞猛进。目前世界上已形成了北美、西欧和远东三个光纤通信发达地区，其代表国家分别为美国、英国和日本。他们都在技术上处于领先地位。在这些先进的工业国家里，短波长和长波长多模和单模光纤传输系统，在技术上已经完全成熟，并进入了大规模商用阶段。基础器件等都已实用化和商品化。成缆后的多模光纤，其损耗已降到了3dB/km以下，单模光纤为1~2dB/km。激光器寿命达10万小时以上，发光管寿命则达100万小时以上。到1983年为止，先进的工业国

家已建成光纤通信系统200多个, 光纤总长度达27万km以上。美国正在实施和已经完成的五大光纤通信工程引人注目。这五大光纤通信工程是东北走廊工程、东部和西部干线工程、大西洋和太平洋洲际海底干线工程等。

三、我国光纤通信事业发展概况

我国在光纤通信技术研究方面, 起步并不算太晚。早在1963年, 就有人对激光大气通信进行研究, 并在青岛附近建立了第一个激光大气通信实验线路。十年动乱使我们丢失了许多宝贵的时间, 致使我国在光纤通信技术的研究和应用方面与先进国家相比出现了较大的差距。我国关于光纤通信技术的研究工作, 大体可分以下三个阶段: 1971~1977年为理论研究阶段, 主要进行基础理论和基础元器件的研究工作。在这期间, 电子工业部和邮电部分别建立了相应的科研机构, 并着手进行这方面的研究工作。1978~1981年为室内试验和现场试验阶段。在这期间, 桂林的中继距离1.8km、通话容量120路的试验线路, 北京的中继距离3.3km、通话容量120路的试验线路, 上海的中继距离1.8km、通话容量120路的试验线路以及武汉的中继距离5.7km、通话容量120路的试验线路等相继建成。另外, 一些传输黑白和彩色电视信号的光纤小传输系统, 也研制成功。1982年至今, 为小规模推广应用阶段。全国已建20多个光纤通信系统, 使用光缆总长在100km以上。

目前, 我国短波长多模光纤传输系统, 技术上已经成熟。长波长1.3 μ m的传输技术也开始了实际应用。成缆后的多模光纤, 其损耗值为3~3.5dB/km, 激光器的寿命为5000~10000小时, 发光二极管的寿命大于10000小时。

四、光纤通信技术的发展趋势与前景

光纤通信从起步研究到目前的大规模应用, 仅仅经历了10多年时间。其发展速度之快, 应用范围之广泛, 实为科技发展史上所罕见。光纤通信发展的标志是构成光纤通信系统的两大基础器件——光电器件和光纤的发展, 以及与此相应的工作波长和传输码速的提高。据此, 我们可以把光纤通信分为第一代光纤通信和第二代光纤通信。

第一代光纤通信为短波长多模光纤通信时代。此时使用的工作波长为0.85~0.9 μ m, 光纤为渐变型多模光纤, 纤芯直径为50 μ m, 损耗低于5dB/km。使用的光电器件, 光源为三元化合物GaAlAs发光管(LED)和激光管(LD), 光检测器为Si的光电管(APD)。通信的中继距离在10km左右, 传输码速在500Mb/s以下。

第一代光纤通信, 主要用于城市内局间的短距离小容量数字传输系统, 以及模拟电视信号的传输。世界上几个先进的工业国家, 早已进入了这一光纤通信时代。我国目前处于这一阶段, 技术已成熟, 并开始大规模商业化应用。

第二代光纤通信为长波长多模和单模光纤通信时代。这一代光纤通信使用波长为1.2~1.6 μ m, 光纤为渐变型多模光纤和损耗低于1dB/km的单模光纤。光电器件为三元化合物InGaAs/InP的光源LED和LD, 及InGaAs/InP的光检测器PIN和GaAs的FET组件。系统的中继距离在30km以上, 传输的码速可达1Gb/s以上。目前在技术上成熟的是在1.3 μ m这一工作波长上。

光纤通信现阶段的发展趋势是明朗的, 概括起来具有以下特点^[1]:

- ①开始由工程量较小的市内话局间通信的建设, 转向工程量较大的长途干线的建设;
- ②市内光纤通信正向本地网路(LAN)方向发展。随着工厂自动化(FA)和办公室自动化

(DA)发展的需要, 光纤本地网路(LAN)技术越来越引起人们的重视;

③工作波长已由短波长 $0.85\mu\text{m}$ 转向长波长 $1.3\mu\text{m}$, 并进一步向 $1.55\mu\text{m}$ 过渡;

④光纤已由多模光纤的生产转向单模光纤的生产。长途干线的光纤通信, 将主要由单模光纤承担;

⑤传输速率正向更高的速率方向发展。1981年, 国际电报电话咨询委员会(CCITT)曾建议以四次群 140Mb/s 作为大容量的标准系统。但是, 几年后日本和美国的 400Mb/s 系统已实用化, 英国的普来塞公司研制的 560Mb/s 系统, 也将安装使用。不久前, 美国的ATT建议把横跨大西洋海底光缆的传输速率由 280Mb/s 改为 560Mb/s 。日本目前正在试验传输速率为 $1\sim 6\text{Gb/s}$ 的传输系统。我国目前的 400Mb/s 系统也基本研制成功;

⑥系统的中继距离已由 10km 左右向 100km 左右迈进。工作波长在 $1.3\mu\text{m}$ 、传输速率为 140Mb/s 时, 中继距离已达 30km ; 传输速率为 400Mb/s 时, 中继距离为 25km 。当工作波长在 $1.55\mu\text{m}$, 采用动态单纵模激光器, 如美国和日本研制的C³激光器和分布反馈式激光器DFB, 在传输速率为 140Mb/s 时, 中继距离可达 $150\sim 170\text{km}$ 。

未来的通信手段, 在空间将主要利用卫星; 而在地面, 将主要利用光缆传输信息。在第一代、第二代光纤通信中, 光电器件和光纤都是分离器件。随着集成光学技术的进一步发展, 未来光纤通信系统中的光端机, 是将所有分离光电器件及部分光波导集成为一块光学膜片。届时的光纤通信将进入全光通信时代, 即进入第三代光纤通信时代^[2]。

§ 1-2 光纤通信系统的组成

光纤通信系统如图1-1所示, 由以下几部分组成:

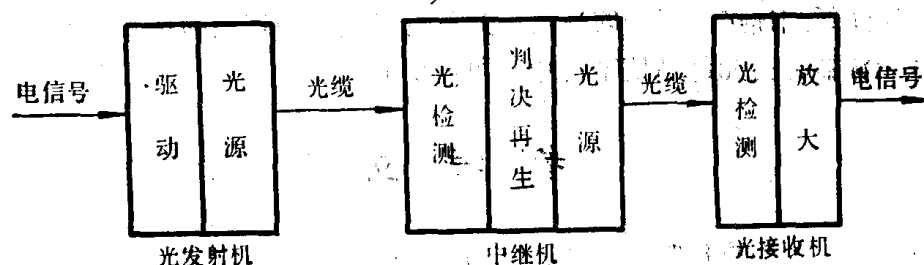


图 1-1 光纤通信系统的组成

(1)光发射机 光发射机是电/光转换的光端机。它由两部分组成: 驱动电路和光源(发光管LED或激光管LD)。它的功能是将电端机(图中未画出)来的电信号转换为光信号, 然后将光信号耦合到光纤或光缆中传输。

(2)光接收机 光接收机是光/电转换的光端机。它也由两部分组成: 光检测器(光电管PIN或雪崩管APD)和放大电路。它的功能是将光纤或光缆传输来的光信号, 经光检测器转变为电信号。然后, 再将这微弱的电信号经放大电路放大到足够的电平, 送入接收端的电端机。

(3)光纤或光缆 光纤或光缆组成光纤传输线。它的功能是将由发射机端光源发出的光信号, 经远距离传输后耦合到接收机端的检测器, 完成信息传输任务。

(4)中继机 中继机也称中继站。含有中继站的光纤传输系统, 称光纤中继通信。

中继站的作用有两个。一是补偿光的衰减，二是对波形失真的脉冲进行整形。光纤具有吸收和散射作用。当光通过光纤传输一定距离后，会出现衰减。另一方面，光纤也具有材料色散、波导色散（结构色散）和模式色散。光通过光纤传输后，会导致脉冲信号的波形失真。这两个因素的存在会使传输线路的噪声和误码率增加，从而使信息传输质量降低。为了克服这一缺点，当用光纤或光缆进行信息的远距离传输时，每隔一定距离设置一个中继站。可见，设置中继站是保证光纤高可靠性和高质量远距离传输不可缺少的一环。

中继站主要由光检测器、光源和判决再生电路组成。光检测器是中继站的接收部分，光源是发射部分。它们的功能和光接收机、光发射机中的光检测器、光源是一样的。判决再生电路主要是指数字通信系统而言。光纤数字通信，目前主要是采用脉码——强度调制方式（*Pulse Code modulation—intensity modulation*）。因此它可以按同轴电缆脉码调制中继方式考虑。这样，判决再生电路应具有3R功能，即应具有脉冲整形（*reshape*）、再生（*regeneration*）和定时信号恢复（*retiming*）三种功能。因为3R功能中继器造价很高，且并非所有的中继器都必须具有3R功能，所以可以采取1R中继器（只具有脉冲整形功能）、2R中继器（具有脉冲整形和再生功能）和3R中继器适当组合的方式，构成混合型中继系统。

对于模拟中继通信，采用所谓检波中继方式，即把光检测器接收到的光信号解调成基带的电信号并予以放大，然后用它去调制光源，并重新发送出去。虽然检波中继方式在频分多路（FDM）信号传输的情况下，中继器都会把光检测器等的失真噪声累加起来，但在中继站少的情况下，这种影响是少的。因此，检波中继方式成为模拟传输系统中的主要中继形式。

（5）光纤连接器、耦合器等无源器件 光纤或光缆的长度受光纤拉制工艺和光缆施工条件的限制。我国目前主要采用改进的化学气相沉积法（MVCVD）制做光纤预制棒。这种工艺制做出来的预制棒，光纤的拉制长度一般为1km左右。因此，在一条光纤或光缆传输系统中，必有多根光纤相连接。光纤的连接，光纤与光端机的连接与耦合，需要光纤连接器和耦合器。这些无源器件是光纤通信系统中不可缺少的。

参 考 文 献

- 〔1〕黎全桃. 各国的长距离光纤系统. 光通信技术, 1984; 6.
- 〔2〕华卫. 国外光纤通信技术的发展. 光纤通信, 1983; 1.

第二章 光纤与光缆

光纤通信是以光传递信息的。光导纤维（即光纤）是信息传输的主要介质。因此，首先应对光导纤维的构造与分类、传光原理以及有关特性有所了解。在实际的光纤通信中，光纤是以光缆的形式出现的。为此，本章对光缆的结构也作了简单的说明。

光纤的特性包括几何结构特性、光学特性和传输特性等。几何结构特性主要是以其芯与包层的几何尺寸来描述。光学特性用其剖面（横断面）的折射率分布或剖面指数和数值孔径来描述。光纤的传输特性则用其损耗和色散（或带宽）来描述。

光是一种电磁波。光在光纤中的传播，是电磁波在一定介质范围内的传播。因此，本章对光纤某些特性的理论分析，采用电磁场理论，即波动光学的方法进行。采用这种分析方法，既可获得有关光纤的模式、截止波长和归一化频率等重要概念，也可对光纤的场结构或场图给出清楚明了的结果。

另外，几何光学法也是分析多模光纤某些特性的重要方法。在本章也将采用这种分析方法。

随着光纤通信技术的不断发展，单模光纤将取代多模光纤。因此本章对单模光纤的一个重要特性——偏振，也作了讨论。

§ 2-1 光纤的构造

光纤的构造如图2-1所示。它是由纤芯、包层、涂敷层及套塑四部分组成。

纤芯位于光纤的中心部位。它的主要成分是高纯度的二氧化硅。其纯度要达到99.99999%。其余成分为掺入的极少量掺杂剂，如五氧化二磷（ P_2O_5 ）和二氧化锗（ GeO_2 ）。掺杂剂的作用是提 高纤芯的折射率。纤芯的直径 $2a$ 一般为 $5 \sim 50\mu m$ 。包层也是含有少量掺杂剂的高纯度二氧化硅。掺杂剂有氟或硼。这些掺杂剂的作用是降低包层的折射率。包层的直径（包括纤芯在内） $2b$ 为 $125\mu m$ 。包层的外面涂敷一层很薄的涂敷层。通常要进行两次涂敷。它的作用是增强光纤的机械强度。目前涂敷层的材料一般为环氧树脂或硅橡胶。涂敷层之外就是套塑。它的作用也是加强光纤的机械强度。套塑的原料大都采用尼龙或聚乙烯。

有关光纤结构尺寸的严格定义和测量问题，将在第七章光纤测试技术中讨论。

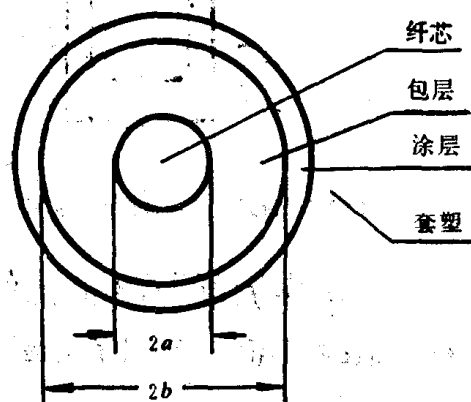


图 2-1 光纤的剖面（横断面）构造

§ 2-2 光纤的分类

一、阶跃型光纤与渐变型光纤

根据光纤芯部与包层折射率的分布情况, 光纤分为两大类。

1. 阶跃型光纤 (SI—Step index fiber)

这种光纤芯和包层的折射率都为—常数, 其界面处呈阶跃式变化, 如图 2-2 所示。其中 n_1 是芯的折射率, 分布是均匀的。其值略高一些, 例如 $n_1=1.51$ 。 n_2 是包层的折射率, 分布也是均匀的, 其值略低一些, 例如 $n_2=1.50$ 。二者之差 $\Delta n=n_1-n_2=0.01$ 。芯的直径是 $2a$ 。对于多模光纤, 其值为 $50\mu\text{m}$; 对于单模光纤, 则为 $5\sim 10\mu\text{m}$ 左右。包层直径为 $2b$, 一般为 $125\mu\text{m}$ 。

2. 渐变型光纤 (GI—Graded index fiber)

渐变型光纤又称梯度型光纤。这种光纤的折射率在包层部分是均匀分布的, 即 n_2 为一常数。但在芯部, 其分布则由包层起逐渐增大, 并在芯的中心处达到最大值 n_1 。或者说渐变型光纤芯部折射率是其半径 r 的函数 $n(r)$ 。如图 2-3 所示。

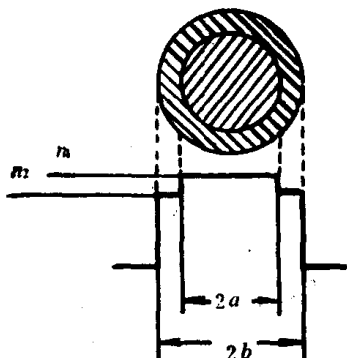


图 2-2 阶跃光纤的横截面和折射率分布

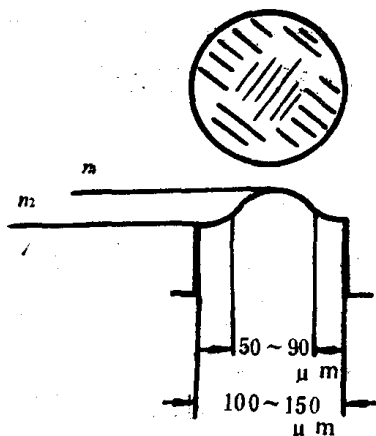


图 2-3 渐变型光纤的横截面和折射率分布

二、多模光纤与单模光纤⁽¹⁾

根据电磁场理论, 光纤中存在着许多不同的传输模式。按照传输模式的多少, 光纤又可分为以下两类:

1. 多模光纤 (MM—Multi mode fiber)

当光纤中传输的模式是多个时, 则称为多模光纤。多模光纤剖面折射率的分布, 有阶跃型的, 也有渐变型的。前者称为阶跃型多模光纤, 后者称为渐变型多模光纤。

多模光纤中传输的模数量, 根据 WKB 法计算的结果为

$$N = a^2 K^2 n_1^2 \Delta \frac{\alpha}{\alpha + 2} \quad (2-1)$$

式中, K 是波数; λ 是光波波长; α 是光纤的剖面指数; Δ 是光纤的相对折射率差。

对于阶跃型光纤, 其剖面指数 $\alpha = \infty$, 其中传输的模数量为

$$N = a^2 k^2 n_1^2 \Delta \frac{V^2}{2} \quad (2-2)$$

对于渐变型多模光纤，其剖面指数 $\alpha \approx 2$ ，其中传输的模数量为

$$N = a^2 k^2 n_1^2 \Delta \cdot \frac{1}{2} = \frac{V^2}{4} \quad (2-3)$$

式中， V 为光纤的归一化频率，其值为

$$V = \sqrt{2\Delta} n_1 k a \quad (2-4)$$

可见它与光纤的结构参数 Δ 、 n_1 和 a 有关，因此， V 又称为光纤的结构参数。它的大小反映了光纤中传输模数量的多少。由式 (2-4) 可以看出，光纤的结构参数 Δ 、 n_1 和 a 越大，归化频率 V 就越高，从而光纤中传输的模数量 N 就越多。

2. 单模光纤 (SM—Single mode fiber)

光纤中只能传输一个模式的光波时，这种光纤称为单模光纤。实现单模传输的光纤，要求其芯径 $2a$ 很小，通常 $2a = 5 \sim 10 \mu\text{m}$ 。芯径这样细的光纤，由于工艺上的困难，其折射率的分布只能是均匀的。因此，单模光纤剖面折射率的分布属于阶跃型的，如图 2-4 所示。

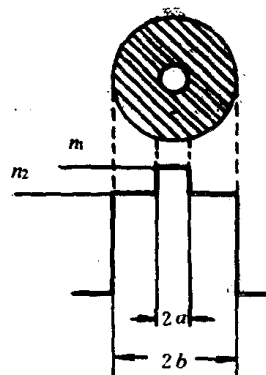


图 2-4 单模光纤的横截面及折射率分布

§ 2-3 光纤制作方法简介

光纤的制作主要有两大工序。一是光纤预制件 (预制棒) 的烧制，另一是光纤的拉丝与涂敷。其中预制件的制作，对降低光纤的损耗、提高带宽以及降低光纤的制作成本等起重要作用。降低光纤损耗的办法，是消除预制件中的 OH^- 离子和降低其它杂质。提高光纤带宽的措施，是选择恰当的光纤剖面折射率的分布系数 α 。降低光纤的制作成本，必须设法提高烧制预制棒时的沉积速率。为此，对光纤预制件的制作，主要介绍以下三种工艺：

一、MCVD法

MCVD法即改进的化学气相沉积法。这种制作光纤预制棒的方法，工艺比较简单，为世界各国所普遍采用。我国目前也主要采用这种方法。

采用MCVD法制作的光纤预制件，拉制出光纤的损耗在 3dB/km 以下，光纤带宽大于 $200\text{MHz} \cdot \text{km}$ ，预制件的制作周期为 $6 \sim 10$ 小时，每一预制件的拉丝长度为 $1 \sim 10\text{km}$ 。我国用此法制作的预制件，每件的拉丝长度为 1km 左右。

二、PCVD法

此法称为高频等离子体化学气相沉积法。它与改进的化学气相沉积法 (MCVD) 的不同处，在于烧制预制棒时的加热方式不同。它是利用高频电能，对加入石英玻璃管内的掺杂质进行高频加热沉积而成。PCVD法目前为荷兰飞利浦公司拥有。这种方法的沉积速率很高，可达 $6 \sim 10\text{g/min}$ ，制作出的预制棒，可控制的光纤长度为 20km 左右。

三、VAD法

VAD法称为化学气相轴向沉积法。这一工艺的优点，是烧制出来的预制件可以很粗，

很长,从而使拉制的光纤长度可大大加长,一般为10~30km,最高可达60~100km。另外,这种工艺可使预制件中的 OH^- 离子浓度极低,从而可使光纤的损耗降低到最低值,为0.2dB/km以下。VAD法目前主要为日本所拥有,我国正在建立这种工艺。

§ 2-4 光 缆

光纤在实际的通信应用中,都要制作成光缆。光缆分为单芯光缆与多芯光缆。多芯光缆又有四芯、六芯、八芯之分。

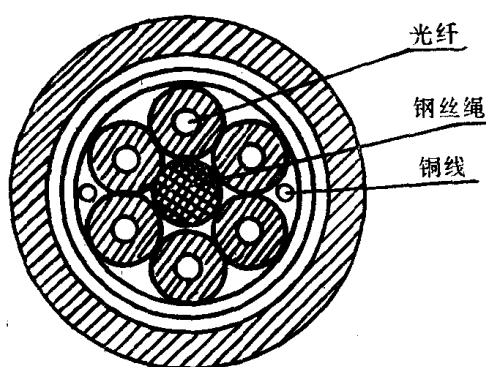


图 2-5 六芯光缆剖面图

光纤成缆后,要有足够的机械强度。为此,在光缆中除必要的纤芯数量外,还应有增强光缆机械强度的加固件。通常,加固件是由多股的钢丝绳来充任。另外,光纤只能传输光信号而不能传输电信号。为了保证中继站间电信号的联系,或为了保证无电源供给的中继站电的供应,在光缆中通常还有一对塑料包层的铜线。光缆的具体结构,应根据不同的需要进行设计。图2-5所示为通信用的一种六芯光缆的剖面图。

§ 2-5 光纤的传光原理

分析光纤的传光原理有两种方法:一为波动光学法,一为几何光学法。波动光学法是将光波按电磁场理论,用麦克斯韦方程组(波动方程)解析其传播特性。将在讨论光纤的传光原理和光纤中的模式理论时采用它。几何光学法是将光波的波长近似为零的波动理论。波动理论变为射线理论,即将光看成是一条条的几何射线。采用射线理论分析光纤的传光原理比较直观,而且可以给出光在光纤中传播的直接概念。完整的射线理论要用射线方程。在讨论光纤的色散特性时,将采用几何光学分析法。为了简述光纤的传光原理,先用光的波动理论概述光波在两种介质分界面处的反射、折射和全反射问题。

一、光的反射和折射

当平面光波由一种介质斜入射到另一种介质时,在两种介质的分界面处将要分成两个波:一个是通过分界面进入第二种介质的波,称为透射波或折射波;另一个是由分界面又反射回到第一种介质的波,称为反射波。

设两种介质都是均匀的,它们的有关常数分别为 $\mu_1=\mu_0$, $n_1=\sqrt{\epsilon_1}$ 和 $\mu_2=\mu_0$, $n_2=\sqrt{\epsilon_2}$ 。因为光波的电场矢量 $\mathbf{E}$ 的方向不一定与入射面垂直或平行,但总可以把它分解为垂直入射面的分量 $E_{\perp}$ 和平行入射面的分量 $E_{\parallel}$,如图2-6所示。

设平面光波 $\mathbf{E}=\mathbf{A}e^{-j(\omega t-\mathbf{k}\cdot\mathbf{r})}$ 沿着图示的入射面 xoz 斜入射到分界面 xoy 上,其中, θ_1 、 θ_1' 和 θ_2 分别为入射角、反射角和折射角。对上述两种斜入射讨论的方法和结果都是一样的。下面,以电场矢量 $\mathbf{E}$ 垂直入射面的斜入射为例,讨论光波在两种介质分界面处的反射和折射规律。

图中的 $E_{\perp}$ 、 $E_{\perp}'$ 和 $E_{\perp}''$ 分别表示入射波、反射波和折射波的垂直入射面的电场矢量分量,

根据波动理论, 它们的波动公式应为

$$E_{\perp} = E_{1\perp} = A_{\perp} e^{j[k_1(x \sin \theta_1 + z \cos \theta_1) - \omega_1 t]} \quad (2-5)$$

$$E'_{\perp} = E_{1\perp}' = A'_{\perp} e^{j[k_1(x \sin \theta_1' - z \cos \theta_1') - \omega_1' t]} \quad (2-6)$$

$$E'_{\perp} = E_{2\perp} = A'_{\perp} e^{j[k_2(x \sin \theta_2 + z \cos \theta_2) - \omega_2 t]} \quad (2-7)$$

式中, ω_1 、 ω_1' 和 ω_2 分别为入射波、反射波和折射波的角频率; k_1 和 k_2 分别为平面波在第一种介质和第二种介质中的波数。根据电磁场的边界条件, 电场矢量 $\mathbf{E}$ 和磁场矢量 $\mathbf{H}$, 在分界面处的切线分量是连续的, 即

$$E_{1\perp} + E_{1\perp}' = E_{2\perp} \quad (2-8)$$

$$H_{1\parallel} + H_{1\parallel}' = H_{2\parallel} \quad (2-9)$$

将式 (2-5) ~ (2-7) 中 $z=0$ 的 $E_{1\perp}$ 、 $E_{1\perp}'$ 和 $E_{2\perp}$ 代入式 (2-8) 中, 则得

$$\begin{aligned} A_{\perp} e^{j(k_1 x \sin \theta_1 - \omega_1 t)} + A'_{\perp} e^{j(k_1 x \sin \theta_1' - \omega_1' t)} \\ = A'_{\perp} e^{j(k_2 x \sin \theta_2 - \omega_2 t)} \end{aligned} \quad (2-10)$$

将式 (2-10) 对 t 微分后, 则有

$$\begin{aligned} j\omega_1 A_{\perp} e^{j(k_1 x \sin \theta_1 - \omega_1 t)} + j\omega_1' A'_{\perp} e^{j(k_1 x \sin \theta_1' - \omega_1' t)} \\ = j\omega_2 A'_{\perp} e^{j(k_2 x \sin \theta_2 - \omega_2 t)} \end{aligned} \quad (2-11)$$

比较式 (2-10) 和式 (2-11), 显然可得

$$\omega_1 = \omega_1' = \omega_2 \quad (2-12)$$

即入射波、反射波和折射波的振荡频率是完全相同的。由于电磁场的边界条件对于 x 和 t 的任何值都成立, 所以式 (2-10) 中各项指数也必然相等。因此可得

$$k_1 \sin \theta_1 = k_1 \sin \theta_1' = k_2 \sin \theta_2 \quad (2-13)$$

由第一个等式可得

$$\theta_1 = \theta_1' \quad (2-14)$$

即入射角等于反射角。由另一个等式得

$$\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{k_2}{k_1} = \sqrt{\frac{\epsilon_2}{\epsilon_1}} = \frac{n_2}{n_1} \quad (2-15)$$

即入射角与折射角正弦之比等于第二种介质与第一种介质折射率之比。这就是著名的折射定律, 称为斯涅耳 (Snell) 定律。

因为 $v = 1/\sqrt{\mu\epsilon}$, 可得 $\sin \theta_1 / \sin \theta_2 = v_1 / v_2$ 。根据式 (2-15) 又可得 $v_1 / v_2 = n_2 / n_1$ 。因为光在真空中的速度为 c , 而真空的折射率为 1, 所以光在任何一种介质中的传播速度为

$$v = \frac{c}{n} \quad (2-16)$$

二、光的全反射

在图 2-6 中, 如果 $n_1 > n_2$, 表明光波是由光密介质斜入射向光疏介质。由式 (2-15) 可得 $\sin \theta_1 / \sin \theta_2 = n_2 / n_1 < 1$ 。当 $\sin \theta_1 > n_2 / n_1$ 时, 会有 $\sin \theta_2 > 1$ 的结果。这是没有意义

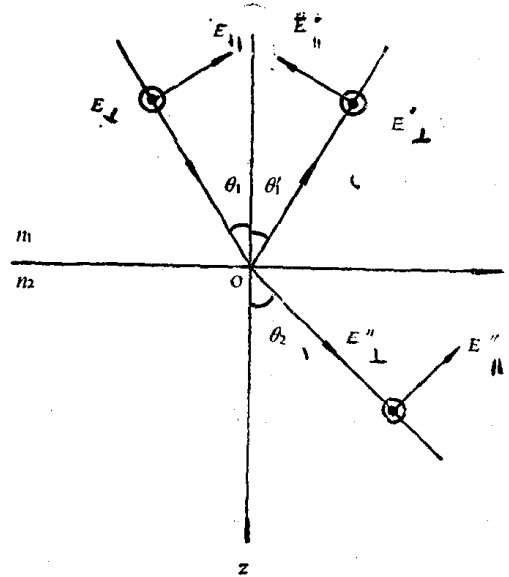


图 2-6 两种介质分界面处光的反射和折射

的, 此时不可能求出任何实数的折射角。事实上, 在这种情况下, 第二种介质中是没有折射光存在的, 所有入射光在分界面处被全部反射回到第一种介质。这种现象称为光的全反射。满足条件 $\sin\theta_c=n_2/n_1$ 的入射角 θ_c , 称为临界角, 相应的折射角为 $\theta_2=90^\circ$ 。临界角的大小, 可由下式求得

$$\theta_c=\arcsin\frac{n_2}{n_1}$$

如图2-7所示, 如果此时的入射角 θ_1 略大于临界角 θ_c , 则全反射现象就会发生。因此可以得出结论, 光波在两种介质分界面处发生全反射的条件是:

- ①光波必须是由光密介质(或折射率高的介质)斜入射到光疏介质(或折射率低的介质);
- ②光波的入射角 θ_1 必须大于其临界角 θ_c 。

上述结果, 对于电场矢量 E 平行入射面的斜入射也是一样的。

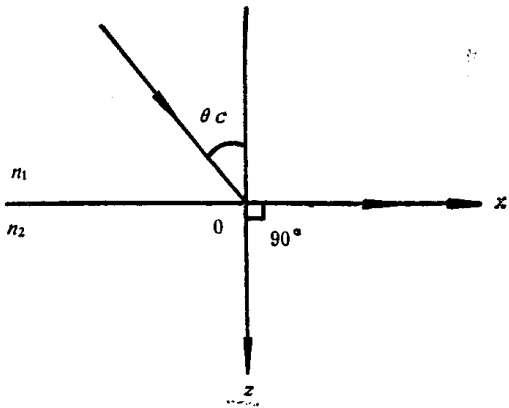


图 2-7 光的临界入射状态

三、光纤中光的传播

由于光纤是由纤芯和包层构成, 而且其纤芯的折射率 n_1 高于包层的折射率 n_2 , 因此, 当光入射到光纤的芯子之后, 在纤芯与包层界面处满足全反射条件的光线, 将在纤芯与包层之间形成全反射, 于是光便在光纤中沿光纤的轴向向前传播, 如图2-8所示。图中渐变光纤中的光, 其传播途径呈曲线状的原因, 是由于其纤芯的折射率呈渐变状, 光在其中不断地产生折射, 从而使光的途径变为曲线状。单模光纤中的光, 其传播途径几乎是沿纤芯的轴心。

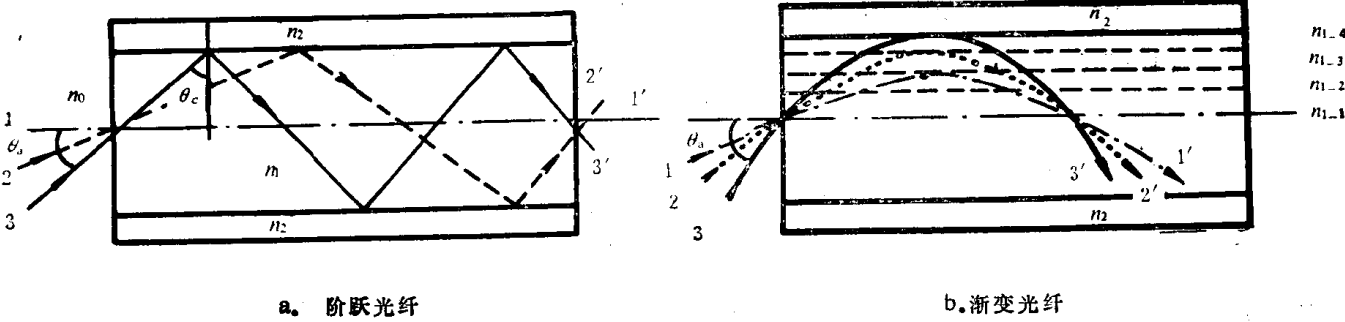


图 2-8 光纤中的子午线

光纤芯子的折射率 n_1 和包层的折射率 n_2 间的差值, 决定了临界角的大小。差值越大, 临界角越小, 越容易实现全反射。但这个差值也不能太大, 光纤通信用的多模光纤, 其相对折射率差一般设计为 $\Delta=(n_1-n_2)/n_1=0.01$ 左右。

以上的讨论, 仅适用于通过光纤轴心平面(称子午面)的那些光线的传播情况。如果光线不通过光纤的轴心平面, 则称这些光线为斜射线, 这时, 光线是呈斜折线或螺旋形式前进的, 如图2-9所示。