



高等学校电子与通信类专业“十二五”规划教材

现代光纤通信

敖发良 陈名松 敖 珺 等编著



西安电子科技大学出版社
<http://www.xduph.com>

高等学校电子与通信类专业“十二五”规划教材

现代光纤通信

敖发良 陈名松 敖 珺 编著
于胜云 何 宁

西安电子科技大学出版社

内 容 简 介

本书根据光纤通信的发展形势,总结了作者近20年从事光纤通信教学的经验,并参考了国内外大量现有的教材和重要文献编写而成。

本书在介绍光纤通信技术有关基础知识的同时,还增加了近几年出现的新技术、新方法和新电路。本书围绕光纤通信中长距离传输这条主线,融合了有关色散、色散补偿光纤、色散补偿技术和光放大等最新技术;围绕光纤通信中要求大容量这条主线,融合了波分复用技术;最后以海底光缆通信系统为例,给出了长距离大容量光纤通信的典型应用。

本书可以作为大学本科有关专业的教材,可以作为研究生的教学参考书,也可以作为有关技术人员和自学者的学习参考书。

★本书配有电子教案,需要者可登录出版社网站,免费下载。

图书在版编目(CIP)数据

现代光纤通信/敖发良,陈名松,敖珺等编著. —西安:西安电子科技大学出版社,2011.8

高等学校电子与通信类专业“十二五”规划教材

ISBN 978-7-5606-2617-8

I. ①现… II. ①敖… ②陈… ③敖… III. ①光纤通信—高等学校—教材

IV. ①TN929.11

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 123385 号

责任编辑 张 玮 李文娟

出版发行 西安电子科技大学出版社(西安市太白南路2号)

电 话 (029)88242885 88201467 邮 编 710071

网 址 www.xduph.com 电子邮箱 xdupfxb001@163.com

经 销 新华书店

印刷单位 陕西华沐印刷科技有限责任公司

版 次 2011年8月第1版 2011年8月第1次印刷

开 本 787毫米×1092毫米 1/16 印 张 23

字 数 548千字

印 数 1~3000册

定 价 37.00元

ISBN 978-7-5606-2617-8/TN·0613

XDUP 2909001-1

*** 如有印装问题可调换 ***

前 言

光纤通信技术以其无与伦比的优越性,即宽频带、高速率、低损耗、远距离,抗电磁干扰和卓越的联网能力,在现代通信领域得到了广泛的应用。也正是光纤通信技术的发展和应用,强有力地推动着人类社会向信息化方向迈进。可以说,光纤通信及其技术的广泛应用,已经成为支撑国家乃至国际信息基础设施的基石。

光纤通信技术的发展十分迅速,可以说是日新月异。单信道容量、系统总容量、无中继传输距离等标志性指标不断刷新。经常出现这样的情况:某个公司某项指标的世界最新纪录刚刚宣布不久,就又会出现了新的实验打破这个纪录。

本书就是根据光纤通信的上述发展形势,总结我们教研室近 20 年从事光纤通信教学的经验,参考了国内外大量现有的教材和重要文献编写而成的。

除前言和第 1 章概述外,本书分为四部分:第一部分是基础部分,包括光纤传输基本理论(第 2 章)、光纤线路技术及器件(第 3 章)、光发信机(第 4 章)、光收信机(第 5 章);第二部分是系统部分,包括模拟光纤通信系统(第 6 章)、光纤通信系统的总体设计和系统实例(第 7 章)和光纤通信网络(第 8 章);第三部分是光纤通信新技术(第 9 章);第四部分是实验(附录 2)。

本书具有以下特点:

- (1) 坚持把电通信与光通信对比,便于读者理解、学习;
- (2) 语言通俗易懂,并有大量的应用实例,每一章后面都附有习题,便于教学,便于读者掌握光纤通信的真谛;
- (3) 在介绍光纤通信技术有关基础知识的同时,还大量增加了近几年出现的新技术、新方法和新的电路;
- (4) 围绕光纤通信中长距离传输这条主线,融合了有关色散、色散补偿光纤、色散补偿技术和光放大等最新技术;
- (5) 围绕光纤通信中要求大容量这条主线,融合了波分复用技术;
- (6) 最后以海底光缆通信系统为例,给出了长距离大容量光纤通信的典型应用。

本书共分 9 章,其中第 1、2、3、9 章由陈名松同志执笔,第 8 章由于胜云同志执笔,实验部分由何宁同志执笔,第 4、5 章由敖发良同志执笔,第 6、7 章由敖珺同志执笔,最后由敖发良同志统稿。

本书可以作为大学本科有关专业的教材,可以作为研究生的教学参考书,也可以作为有关技术人员和自学者学习参考书。

由于光纤通信技术应用范围广、发展快,再加之编者知识水平有限,书中难免有不足之处。我们衷心地希望广大读者不吝指教,提出宝贵的意见。

编 者

2011 年 3 月于桂林电子科技大学

目 录

第1章 概论	1	2.3.4 非均匀单模光纤的近似分析	43
1.1 光通信的发展史	1	2.3.5 单模光纤中的偏振态传输特性	44
1.2 光纤通信的基本概念和特点	3	2.4 光纤传输中的非线性现象	46
1.2.1 光纤通信的光波波段	3	2.4.1 受激喇曼散射(SRS)	47
1.2.2 光纤通信的基本组成	3	2.4.2 受激布里渊散射(SBS)	51
1.2.3 光纤通信的优点	4	2.4.3 非线性折射率及相关非线性现象	53
1.3 光纤的基本性质	5	习题	56
1.3.1 光纤的结构、材料及制造工艺	5	第3章 光纤线路技术及器件	58
1.3.2 光纤传输衰减	12	3.1 光隔离器和光环行器	58
1.3.3 光纤色散	14	3.1.1 光隔离器	58
1.3.4 光纤的非线性	14	3.1.2 光环行器	60
1.4 光纤通信需要解决的问题	15	3.2 光纤的连接	63
1.4.1 光纤通信系统	16	3.2.1 光纤活动连接器	63
1.4.2 光纤通信要解决的基本问题	17	3.2.2 光纤的熔接	67
1.5 光纤通信发展历史回顾及现状	18	3.3 光衰减器和光开关	68
1.5.1 光纤通信技术开发阶段	19	3.3.1 光衰减器	68
1.5.2 单信道光纤通信技术大发展阶段	20	3.3.2 光开关	68
1.5.3 多信道光纤通信技术大发展阶段	20	3.4 光纤耦合器	72
习题	21	3.5 光纤光栅	75
第2章 光纤传输基本理论	22	3.5.1 光纤的光敏特性	76
2.1 光纤传输基本方程及解	22	3.5.2 光纤光栅的制作	76
2.1.1 麦克斯韦方程与波动方程	22	3.5.3 光纤光栅工作原理及特性	77
2.1.2 波动方程的近似解	23	3.5.4 光纤光栅的应用	81
2.1.3 标量场模的光功率分布	30	3.6 波分复用器件	84
2.1.4 单模与多模光纤的分类及处理方法	31	3.6.1 光栅型波分复用器	85
2.2 多模光纤的光传输特性	32	3.6.2 干涉滤波片型波分复用器	85
2.2.1 阶跃光纤的传输特性	32	3.6.3 阵列波导型波分复用器件	86
2.2.2 梯度光纤的传输特性	34	3.6.4 光梳状滤波器(Interleaver)	88
2.3 单模光纤的光传输特性	37	3.6.5 熔锥型波分复用器件	91
2.3.1 LP_{01} 模的特性与光功率分布	37	3.6.6 波分复用器件的性能指标	92
2.3.2 单模光纤的传输特性	39	3.7 平面及矩形光波导技术及器件	92
2.3.3 单模光纤中 LP_{01} 模的高斯近似	41	3.7.1 各向同性平面和矩形光波导	93
		3.7.2 各向异性光波导(非线性光波导)	94
		3.7.3 光波导的制作	99

3.8 光放大器	101	5.3.1 光收信机的噪声等效模型	177
3.8.1 光放大器分类	101	5.3.2 光电探测器噪声来源	178
3.8.2 EDFA 的原理及结构	102	5.3.3 放大器的等效噪声	180
3.8.3 光放大器的性能参数	104	5.3.4 光收信机输出信噪比的计算	181
3.8.4 光波分复用传输系统使用的 光纤放大器	106	5.4 光收信机的性能计算	183
3.8.5 掺铒光纤放大器的监控技术	109	5.4.1 光、电收信机极限灵敏度的 比较	183
3.9 色散补偿技术	114	5.4.2 光收信机灵敏度的计算	184
3.9.1 光纤型色散补偿技术	114	5.5 光接收机电路举例	196
3.9.2 Fabry-Perot 谐振腔型色散 补偿技术	117	5.5.1 低阻抗前端的前置放大级	197
3.9.3 相位共轭型色散补偿技术	120	5.5.2 高阻抗前端的前置放大级	197
3.9.4 偏振模色散补偿器	122	5.5.3 互阻抗前端的前置放大级	197
习题	124	5.5.4 1.3 μm PIN-FET 前端 放大模块	199
第 4 章 光发信机	125	5.5.5 光接收机组件及光收发 信组件	200
4.1 引言	125	习题	203
4.2 半导体激光器(LD)	126	第 6 章 模拟光纤通信系统	205
4.2.1 基本概念	126	6.1 光纤通信中常用的调制方法及其 分类	205
4.2.2 半导体激光器的工作原理及 典型结构	132	6.2 模拟基带调制	207
4.3 半导体激光器的主要特性	134	6.3 光纤副载波调幅—强度调制 (SCM-IM)	208
4.3.1 半导体激光器的光谱特性	134	6.4 光纤副载波频率调制(FM-IM)	213
4.3.2 半导体激光器的出光特性和 伏安特性	140	6.5 脉冲调频(PFM-IM)和方波调频 (SWFM-IM)	215
4.3.3 半导体激光器的调制特性	142	习题	218
4.3.4 半导体激光器的典型参数	149	第 7 章 光纤通信系统的总体设计和 系统实例	219
4.4 半导体发光二极管(LED)	149	7.1 光纤通信系统的总体设计	219
4.4.1 半导体发光二极管的结构和 原理	150	7.1.1 通信距离受光纤衰减限制的 情况	219
4.4.2 半导体发光二极管的特性	150	7.1.2 通信距离受光纤带宽限制的 情况	220
4.5 量子阱激光器	152	7.1.3 线路码型的考虑	227
4.5.1 量子阱激光二极管的能带图	152	7.1.4 收信机灵敏度曲线	233
4.5.2 量子阱激光二极管的优点	152	7.1.5 总体设计举例	233
4.6 激光发信机电路	153	7.2 数字光纤传输系统举例	236
4.6.1 模拟调制电路	154	7.2.1 140 Mb/s 数字彩电传输系统	236
4.6.2 数字调制电路	157	7.2.2 某小区综合信息网络工程 实例	241
习题	167	7.3 超长距离超大容量光纤通信系统	244
第 5 章 光收信机	171		
5.1 引言	171		
5.2 光电探测器	171		
5.2.1 PIN 光电二极管	172		
5.2.2 雪崩光电二极管(APD)	174		
5.3 光收信机的噪声特性	177		

7.3.1 超长距离光纤通信系统	244	8.3.6 WDM 的网管	307
7.3.2 大容量光纤通信系统	261	8.4 ASON 的体系结构和实现技术	308
7.4 海底光缆通信系统	269	8.4.1 ASON 的基本概念	308
7.4.1 海缆系统简介	269	8.4.2 ASON 控制平面结构	313
7.4.2 海底设备	272	8.4.3 ASON 应用及发展状况	316
7.4.3 陆上设备	273	8.5 城域光网络	319
习题	274	8.5.1 城域 WDM 环网	319
第 8 章 光纤通信网	277	8.5.2 基于 SDH 的多业务传送 平台(MSTP)	321
8.1 SDH 基本概念及网络	277	8.5.3 弹性分组环(RPR)	321
8.1.1 SDH 帧结构	278	8.5.4 城域光传送网的建设和发展	325
8.1.2 SDH 的复用结构与原理	279	8.6 光接入网	326
8.1.3 SDH 设备介绍	281	8.6.1 光接入网概述	326
8.2 SDH 传送网	283	8.6.2 HFC(同轴光纤混合线)	328
8.2.1 SDH 传送网的功能结构	283	8.6.3 FTTH(光纤到户)	330
8.2.2 SDH 网的物理拓扑	285	习题	334
8.2.3 自愈网	286	第 9 章 光纤通信新技术	336
8.2.4 SDH 的网管功能	289	9.1 相干光通信技术	336
8.3 WDM 光网络	291	9.2 光孤子通信技术	340
8.3.1 光传送网(OTN)概念	291	9.3 光交换技术	341
8.3.2 光传送网(OTN)分层结构	292	习题	344
8.3.3 WDM 光传送网的节点功能 和结构	293	附录 1	345
8.3.4 WDM 光网络	299	附录 2	349
8.3.5 WDM 的选路和波长分配 RWA	304	参考文献	359

第1章 概 论

1.1 光通信的发展史

光通信的历史可以追溯到古代的烽火通信,以及现在还在使用的交通信号和水上交通用的“旗语”等,在这些通信方式中,光信号本身即是信息。现在的光通信则有本质不同,它是以光波作为载波,即将信息调制在光载波上的通信方式。光波是一种电磁波,电磁波的波谱图如图1-1-1所示。从图中可见,电磁波频率由低到高,包括音频、长波、中波、短波、微波、光波、X射线、 γ 射线等。无论是有线通信还是无线通信,都是将低频信息(如音频或视频)调制搬移到高频载波上;载波频率越高,其所在频段频带越宽,通信容量越大,所以通信载频由低到高发展,先后经历了长波、中波、短波、微波等无线电波的几个波段。光波频率很高(约 10^{14} 数量级),其通信频带是无线电波(包括长波、中波、短波、微波)频带总和的 $10^3 \sim 10^4$ 倍。因此,对通信频率资源不断开发利用的结果,人们自然想到利用光波作为载波传输信息,因为光通信的传输容量是惊人的。

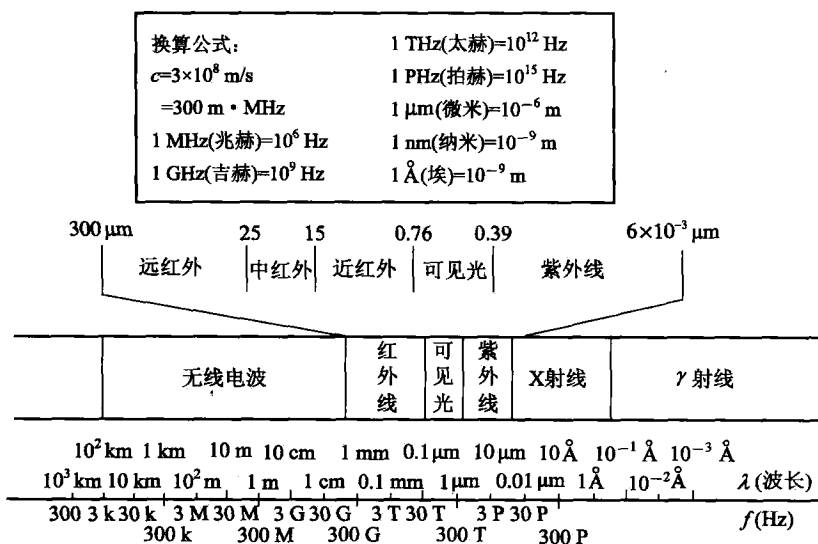


图1-1-1 电磁波的波谱图

光通信的发展主要碰到光源、光传输媒介和光电检测器等技术障碍。早在1880年,美国的贝尔发明了光学电话,他以日光作为光源,采用话筒的薄膜随着声音的振动而振动来实现声光调制,其做法是将日光发出的恒定光束投射到受声音控制的薄膜上,这样从薄膜

上反射回来的光束强弱变化就携带了声音信息；然后这束被调制的光信号经大气传送到接收端，接收端采用一个大型抛物面反射镜反射到一个由硅光电池组成的光电检测器上，光电池接收到由反射镜反射来的携带有信息的光信号后，将其转换成光电流，再把光电流送给听筒发声，从而完成了光电话通信，这种光电话通信距离可以达到 207 米。此后直到 1960 年以前，光通信的发展却几乎停滞不前，这主要是由于日光等光源为非相干光，它的方向性不好，不易调制和传输；以空气作为传输媒介，损耗很大，无法实现远距离传输，而且通信也极不稳定可靠；硅光电池作为光电检测器，内部噪声很大，通信质量很差。

1960 年，美国人梅曼(Maiman)发明了红宝石激光器，它发出的是一种谱线很窄、方向性很好、频率和相位一致的相干光，易于调制和传输。红宝石激光器的出现解决了光源方向的障碍，加速了光通信的研究和发展。

1961~1970 年，人们主要研制利用大气传输光信号，但实践证明，这种方式受到了气候的严重影响，无法实现正常的通信。为此，人们又考虑了各种传输介质，其中包括利用玻璃材料制成光导纤维来传输光信号，但是普通的玻璃材料损耗在 1000 dB/km 以上，因而传输距离很有限。直到 1966 年，英籍华人高锟(K. C. Kao)博士提出普通的二氧化硅(SiO_2)玻璃损耗大的原因是由于其中的杂质造成的，经过提纯后，可实现损耗为 20 dB/km 的光纤。依据高锟博士的理论，1970 年，美国康宁玻璃公司研制成功了损耗为 20 dB/km 的光纤，终于使利用光纤远距离传输光信号成为了可能。1974 年，该公司又把损耗降到了 2 dB/km。1980 年，光纤损耗进一步降低到了 0.2 dB/km，已接近石英系光纤理论损耗的极限。另外，要实现大容量的通信，还要求光纤带宽很大，单模光纤带宽最宽，是理想的传输介质，因此最早人们考虑采用单模光纤。但单模光纤纤芯直径很细，一般为几个微米，所以工艺要求很高，这在 20 世纪 70 年代初是难以达到的，因此，当时大多研究纤芯直径较大的多模光纤。但是多模光纤中传播的光的各个模式间存在光程差，造成光纤有较大的色散，即多模光纤的带宽较窄。直到 1976 年，日本研制出渐变型光纤，又称自聚焦光纤，大大地改善了光纤的带宽，使其可达 1000 MHz。20 世纪 80 年代，由于光纤制作工艺的进步，单模光纤研制成功，其传输带宽达到几十千兆赫至数百千兆赫，这一成果标志着超大容量的光纤通信成为了可能。

光纤通信的实现需要有适当的光源。红宝石激光器发出的光束不容易耦合进光纤中传输，其耦合效率是极低的，因此需要研制小型化的激光光源。1962 年研制成功的镓铝砷(GaAlAs)注入式半导体激光器发光波长为 $0.85\ \mu\text{m}$ ，尽管这种激光器当时无法在室温下运行，其寿命很短，但是由于它的发光波长与 20 世纪 70 年代初光纤的低衰减窗口相吻合，而且半导体光源体积小，易于与光纤耦合，因而成了研究的重点。经过不懈的努力，1970 年终于研制成功了可在室温下连续运行的 GaAlAs 双异质结注入式激光器。与此同时， GaAlAs 发光二极管也制造成功。发光二极管寿命长，但速率较低，功率小，谱线宽，属于非相干光源。随着工艺的进步，短波长($0.85\ \mu\text{m}$) GaAlAs 激光器的寿命已达几十万小时。为了配合光纤的长波长窗口($1.3\ \mu\text{m}$ 和 $1.55\ \mu\text{m}$)，铟镓砷磷(InGaAsP)半导体材料的长波长激光器和发光二极管也相继研制成功。

与此同时，光电检测器也相应地得到了发展，适用于短波长的半导体光电检测器如硅光二极管(Si-PIN)和硅雪崩光电二极管(Si-APD)，以及适用于长波长的 InGaAsP/InP 、 Ge 光电二极管(PIN)和雪崩光电二极管(APD)也相继研制成功。

这样,光通信的难题相继解决,光纤通信的研究在世界范围内展开并迅猛发展。1976年后,各种实用的光纤通信系统陆续出现,美国首先在亚特兰大安装了商用系统,其码速率为44 Mb/s,传输距离为10 km左右。到了20世纪80年代之后,世界上许多国家都成功研制了商用的光纤通信系统,短波长波段($0.85\text{ }\mu\text{m}$),码速率一般在140 Mb/s以下,采用多模光纤,传输距离为10 km左右;长波长波段($1.3\text{ }\mu\text{m}$),码速率通常在每秒几百兆比特至几吉比特,采用多模光纤或单模光纤,传输距离达30 km以上。这些系统的性能已经达到并超过了原有的电缆系统性能。光纤通信系统通信容量大、传输距离远的优越性已经充分体现出来。

因此,20世纪80年代中后期以来由于光纤通信的优越性,世界各国纷纷宣布本国的长途通信系统将不再建设电缆线路,而代之以光纤光缆线路,光纤通信得到了飞速的发展。

1.2 光纤通信的基本概念和特点

1.2.1 光纤通信的光波波段

从图1-1-1中可见,光波由红外线、可见光、紫外线等波段组成,其波长范围 λ 在 $300\sim 6\times 10^{-3}\text{ }\mu\text{m}$ 之间。可见光是人们熟悉的光波,它由红、橙、黄、绿、蓝、青、紫等七种颜色的连续光波组成,其波长范围为 $0.76\sim 0.39\text{ }\mu\text{m}$,其中红光的波长最长,紫光的波长最短。红外线和紫外线都属于不可见光。红外线波长范围为 $300\sim 0.76\text{ }\mu\text{m}$,它又可以按波长划分为近红外、中红外及远红外。紫外线的波长范围为 $0.39\sim 6\times 10^{-3}\text{ }\mu\text{m}$ 。

目前,光纤通信的工作波长在 $0.8\sim 1.8\text{ }\mu\text{m}$ 之间,属近红外波段,通常又将工作波长在 $0.8\sim 0.9\text{ }\mu\text{m}$ 之间的称为短波长,波长在 $1.0\sim 1.8\text{ }\mu\text{m}$ 之间的称为长波长。短波长波段主要是指 $0.85\text{ }\mu\text{m}$ 波长范围,长波长波段主要是指 $1.31\text{ }\mu\text{m}$ 和 $1.55\text{ }\mu\text{m}$ 波长范围,这是目前光通信中主要采用的三个光纤通信窗口。

1.2.2 光纤通信的基本组成

光纤通信系统种类很多,但其基本构成是相同的,都是由光发送端机、光接收端机和光纤光缆组成的。若通信距离长,还必须设置光中继器。考虑到目前各种信息尚无法直接转变成光信号,而是要先转换成电信号,以电信号的方式进行交换、复用等,所以光纤通信系统中通常还包括电端机(由电发送端机和电接收端机组成)。这样,光纤通信系统的基本组成如图1-2-1所示。从图中可见,它由电端机、光端机(由光发送端机和光接收端机组成)、光中继器和光纤光缆组成。下面以单向通信的情况说明各部分的作用。



图 1-2-1 光纤通信系统的基本组成

(1) 电发送端机: 主要完成电信号的频分多路复用或时分多路复用,然后将群路信号

送往光发送端机。送往光端机的信号可能是模拟信号,也可能是数字信号。输出模拟信号的电端机有载波机或电视图像发送设备等,对应的光纤通信系统称为模拟光纤通信系统;输出数字信号的电端机主要有脉冲编码调制(PCM)设备,对应的光纤通信系统称为数字光纤通信系统。由于数字信号抗干扰能力强,因此目前应用的系统大多数属于数字光纤通信系统。

(2) 光发送端机:主要任务是将电发送端机送来的电信号转换为光信号,然后送往光纤光缆传输。电/光变换(E/O)主要由光源器件完成。光纤通信中的光源器件通常都采用半导体材料制成,半导体光源器件包括发光二极管(LED)和激光二极管(LD)两种。LED 发荧光,其发光功率较小,波谱较宽,工作寿命长,主要适用于小容量、短距离的光纤通信系统。LD 发激光,发光功率大,波谱较窄,主要适用于大容量、远距离的光纤通信系统。

(3) 光纤或光缆:主要功能为传送光信号,完成信号传输任务。通信用光纤在结构上主要由纤芯和包层组成,为了保证光信号束缚在纤芯中传播,要求纤芯折射率大于包层折射率。光纤的主要传输特性包括损耗和色散两项,它们是影响光纤通信中继距离和传输容量的决定性因素。在实际应用中,通常将若干根光纤以一定方式制成光缆。光缆中的光纤数,根据需要,有单芯、二芯、四芯、六芯乃至百余芯到数千芯不等。通常,一根光纤传送一个方向的光信号,故双向通信需要两根光纤,但现在已有办法在一根光纤上传送双向光信号,如采用波分复用技术等。

(4) 光中继器:主要功能是将传输后的光信号进行放大再生,以实现远距离的传输。由于光纤存在损耗和色散,光信号经过光纤光缆长距离传输后,光信号被衰减变小,波形也产生畸变,为了保证远距离的通信,每隔一定距离设置光中继器,将接收到的微弱光信号变换成电信号,然后对电信号进行放大或再生处理,再经过光电变换转换为光信号,耦合进光纤光缆继续传输。这种放大再生方式称为光—电—光方式,目前的中继距离一般在几十公里,随着技术的进步,将达到几百公里甚至几千公里。

(5) 光接收机:主要任务是将接收到的光信号再还原为电信号,然后送回电接收端机。光/电变换(O/E)主要由光电检测器完成。光纤通信中采用的光电检测器也是由半导体材料制成的,包括 PIN 型光电二极管和 APD 型光电二极管(雪崩光电二极管)。其中 APD 管在完成光/电转换的同时,通过其雪崩效应可实现对光信号的内部放大作用,有助于提高光接收机的灵敏度。

(6) 电接收端机:同发送端机作用相反,其主要功能为频分解复用或时分分解复用,可为模拟接收设备或数字接收设备。

1.2.3 光纤通信的优点

(1) 传输频带宽,通信容量大。由于通信容量和载波频率成正比,而光纤传输的光载波比传统电通信频率高 10^4 倍以上,所以光纤通信的通信容量在理论上比以往的电通信容量大数万倍以上,目前实际水平已经达到几十倍。如现在已大量投入使用 2.5 Gb/s 数字光纤通信系统,在一根光纤上可同时传输三万多路电话,而以前电通信中容量最大的中同轴电缆,通信容量仅同时传输一千多路电话。

(2) 损耗小,中继距离长。目前使用的石英光纤在 $0.8\sim 1.8\ \mu\text{m}$ 波长范围内损耗比所有传统的电传输线低,尤其在 $1.55\ \mu\text{m}$ 波长处,光纤损耗低达 $0.2\ \text{dB/km}$ 。由于光纤传输

损耗低, 因此中继距离可以达到几十公里, 甚至成百上千公里, 而传统的电传输线中继距离仅为几公里。

(3) 无电磁干扰, 不会产生电光干扰。光纤是非金属介质材料, 它不受电磁干扰, 这是传统的电通信所无法比拟的, 因此光纤通信在电力输配、电气化铁路、核试验等特殊环境有特殊的优越性。此外, 由于光信号束缚在纤芯内传播, 因此不会产生光纤间的串光现象, 这对同一光缆中不同光纤间光信号的传播质量及光缆中光纤的高密度布放等问题带来了很好的保证与方便。

(4) 尺寸小, 重量轻。光纤直径仅为 0.1 mm 左右, 因而制成光缆后, 直径比电缆细, 重量也轻很多, 给工程应用带来极大便利。

(5) 原材料丰富。光纤的主要成分是二氧化硅(SiO_2), 它是组成地球最主要的成分之一, 因而制作光纤的原材料是非常丰富的。同传统的电传输线相比, 光纤传输媒介在通信中的广泛应用节省了大量越来越宝贵的金属材料。

总之, 光纤光缆线路代替传统的金属传输线路是必然的趋势。

1.3 光纤的基本性质

从通信的角度, 人们在研究信道问题时, 最关注的是信道引起的信号衰减和信号畸变。信号衰减从能量的角度限制了信号的传递, 而信号畸变则从信号检测精度的角度限制了信号的传递。因此, 本节主要介绍光纤引起光信号能量损失及光信号畸变的各种特性。

1.3.1 光纤的结构、材料及制造工艺

1. 光纤的结构

光纤是一种丝状的圆柱光波导, 它将光封闭在其内进行传递。大家知道, 光是一种电磁波, 其传播规律可由麦克斯韦方程来描述。当它所传播的空间中介质的物理变化尺寸远大于光的波长时, 光的传播可用简化了的射线理论描述。从射线光学的角度看, 光纤是一种利用全反射原理进行光信号传递的导波介质。下面我们从射线光学的角度简单介绍一下光在光纤中的传输原理。

光在两种均匀介质分界面上的行为如图 1-3-1 所示, MM' 为两介质的分界面, NN' 为 MM' 面的法线, n_1 和 n_2 分别为两介质的折射率。光在均匀介质中沿直线传播, 当光入射到两个介质的分界面时, 一部分光将反射回原传播介质成为反射光, 另一部分光将进入另一介质成为折射光。光的反射服从反射定律: 反射光线位于入射光和法线 NN' 所决定的平面, 反射光与入射光分居法线的两侧, 反射角 φ'_1 等于入射角 φ_1 。光的折射服从如下折射定律: 折射光线位于入射光和法线 NN' 所决定的平面, 折射光与入射光分居法线的两侧, 入射角 φ_1 与折射角 φ_2 的关系为

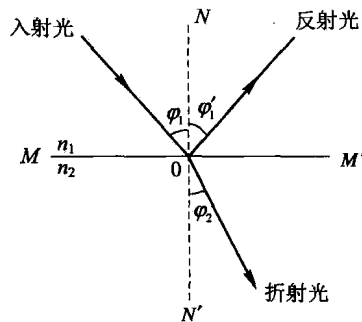


图 1-3-1 光的反射与折射

$$\frac{\sin \varphi_1}{\sin \varphi_2} = \frac{n_2}{n_1} \quad (1-3-1)$$

如图 1-3-2 所示, 当光线从折射率大的介质进入折射率小的介质时, 根据折射定律, 折射角将大于入射角, 当入射角增大时, 折射角也随着增大, 当入射角增大到 φ_0 时, 折射角等于 90° , φ_0 被称为临界角。由式(1-3-1), 临界角为

$$\sin \varphi_0 = \frac{n_2}{n_1} \quad (1-3-2)$$

当入射角大于临界角时, 光由两介质的界面全部反射回原介质, 这种现象称为全反射。在全反射情况下, 光能无损失地返回原介质。显然, 只有当光从折射率大的介质进入折射率小的介质时, 才能产生全反射。

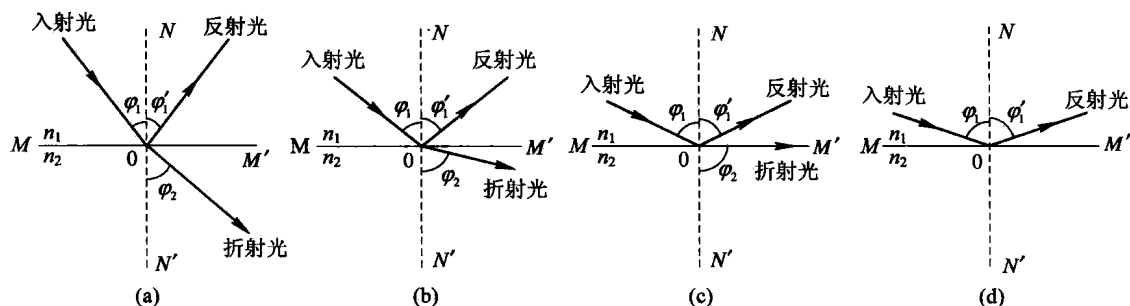


图 1-3-2 全反射过程示意图

光纤就是依据全反射原理构造的一种光波导, 为了将光信号封闭在光纤中传输, 根据全反射原理, 光纤从纤芯到纤芯外部, 折射率应有某种递减的规律, 以保证全反射现象的出现。

图 1-3-3 为一种最基本的光纤结构, 这种光纤称为阶跃光纤, 其纤芯折射率 n_1 大于包层折射率 n_2 。光纤横截面上折射率分布如下式:

$$n(r) = \begin{cases} n_1, & (r \leq a) \\ n_2, & (r > a) \end{cases} \quad (1-3-3)$$

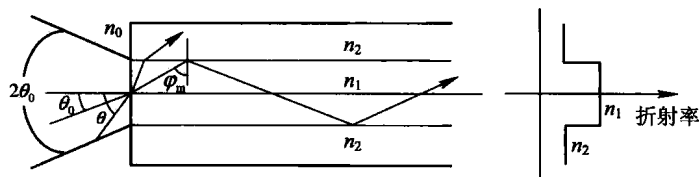


图 1-3-3 阶跃光纤的结构及折射率分布示意图

设光线以某一角度 θ 射入光纤端面, 进入光纤后又以角度 φ 射入到纤芯和包层之间的界面上。因为纤芯折射率 n_1 大于包层折射率 n_2 , 所以纤芯与包层的界面上有一个产生全反射的临界角 φ_m , 相应地, 在光纤端面上也有一临界面入射角 θ_0 。如果 $\theta > \theta_0$, 则光纤内包层界面入射角 $\varphi < \varphi_m$, 这时不会产生全反射, 光线将有一部分进入包层而跑到光纤外面去, 造成能量损失, 经多次反射后光能将全部损耗掉, 无法实现光的长距离传输。如果端面入射角小于 θ_0 , 则光纤内包层界面处的入射角大于 φ_m , 满足全反射条件, 入射光线将在纤芯和包层的分界面上不断地来回反射, 实现光的无损耗传输。

2. 光纤材料及制造工艺

目前, 通信用光纤主要是用高纯度的玻璃材料制成的, 按玻璃内所含化学元素组分的不同, 大体上可分为以石英玻璃(SiO_2)为主的石英系光纤和普通的多组分玻璃光纤两类。普通的多组分玻璃是在 SiO_2 中含有较多成分的碱金属氧化物和硼、铝等氧化物, 它的熔融温度比石英玻璃低得多, 制造成光纤后的抗拉强度也低得多, 因而目前通信中主要使用的是石英光纤。下面结合石英光纤介绍光纤的制造工艺。

制造光纤时, 一般先熔制出一根合适的玻璃棒, 如图 1-3-4 所示。以制造阶跃光纤为例, 玻璃棒的包层和纤芯的主体材料都是石英玻璃, 即透明的 SiO_2 , 石英玻璃的折射率为 1.458。欲使光在光纤纤芯中传输, 必须使纤芯的折射率稍高于包层的折射率, 为此, 在制造纤芯玻璃时均匀地掺入少量的比石英折射率稍高的材料, 而制造包层玻璃时均匀地掺入少量的比石英折射率稍低的材料, 这样就制成了拉制纤维的原始棒体材料, 通常把它叫做光纤的预制棒。然后将预制棒放入高温拉丝炉中加温软化, 以相似比例的尺寸拉成线径很小的又长又细的玻璃丝, 这种玻璃丝中的芯和包层的厚度比例及折射率分布与原始的光纤预制棒的完全一样, 这种玻璃丝就是我们所说的光纤。

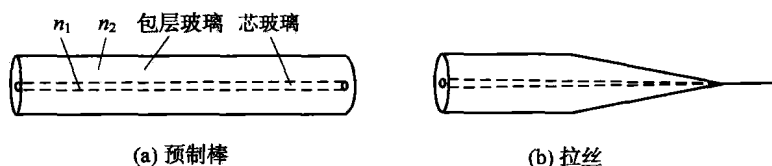


图 1-3-4 光纤的制造工艺

1) 光纤预制棒的制造工艺

光纤预制棒的熔炼工艺很多, 主要有管内化学气相沉积法和管外化学气相沉积法。管内化学气相沉积法是目前制造高质量石英光纤比较稳定可靠的方法, 通常被叫做改进的化学气相沉积法(MCVD法)。它的特点是在石英反应管内沉积内包层和芯层的玻璃, 整个系统是处在封闭的超提纯状态下, 所以用这种方法制得的预制棒可以生产高质量的单模和多模光纤。

MCVD法制造光纤预制棒的示意图如图 1-3-5 所示。

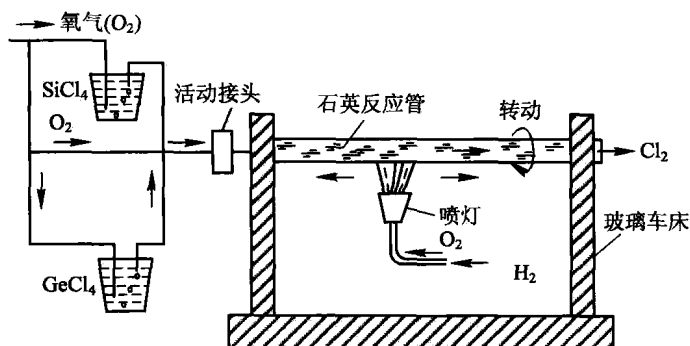


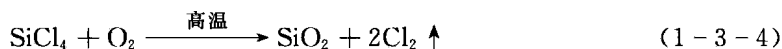
图 1-3-5 MCVD 法

MCVD 法的制造过程分两步:

第一步, 先熔制光纤的内包层玻璃。内包层玻璃的折射率要比石英折射率稍低, 选用

液态的四氯化硅(SiCl_4)作为主体材料,选用氟利昂(CF_2Cl_2)、六氟化硫(SF_6)、四氟化二碳(C_2F_4)等低折射率材料作为掺杂的试剂。把一根外径 18~25 mm,壁厚 1.4~2 mm 的石英反应管夹在玻璃车床上,用超纯氧气(O_2)和氩气(Ar)作为载运气体通过 SiCl_4 和掺杂试剂的蒸发瓶后,含有 SiCl_4 、 CF_2Cl_2 等物质的载运气体就一起导入石英反应管。

当玻璃车床旋转时,用 1400~1600℃ 的高温氢氧火焰加热石英反应管的外壁,这时,管内的 SiCl_4 和 CF_2Cl_2 等试剂在高温下起氧化反应:



反应形成粉尘状氧化物(SiO_2 — SiF_4 等),沉积在高温区气流下游的管内壁上,当氢氧火焰的高温区经过这里时,就在石英反应管的内壁上形成一层均匀透明的掺杂玻璃 SiO_2 — SiF_4 ,氯气(Cl_2)和没反应完的材料均从石英管的尾端排出去。氢氧火焰来回左右移动,每移动一次,就在石英反应管内壁上沉积一层透明的玻璃薄膜,这样不断地重复沉积,就在反应管的内壁上形成一定厚度的 SiO_2 — SiF_4 玻璃层,作为纤维的内包层。

第二步,熔制纤芯玻璃。纤芯的折射率比包层的折射率要稍高,可选用的掺杂材料有三氯氧磷、四氯化锗等。同样用超纯氧气把掺杂物质带入反应管中进行反应,经过一段时间的沉积后,就得到一定厚度的纤芯玻璃。为了消除反应管中最后留下的小孔,可以加大火焰或降低火焰左右移动的速度,并保持石英反应管的旋转状态,使石英管外壁的温度达到 1800℃ 左右。石英反应管在高温下软化收缩,最后形成一个实心的预制棒,原石英反应管和沉积的玻璃熔为一个整体,成为光纤的外包层,外包层不导光。

将 MCVD 法中的氢氧火焰加热改为微波腔体加热就是所谓的等离子体激活化学气相沉积法(PCVD)。它的原理是把中小功率的微波能量送入谐振腔中,使谐振腔内石英反应管内的低压气体受激产生辉光放电来实现加温氧化沉积玻璃,这种工艺的特点是:

(1) 沉积温度低于相应的热反应温度,反应管不易变形。

(2) 由于气体电离不受反应管的热容量的限制,微波加热体可沿反应管做快速往返运动,沉积厚度可小于 1 μm ,从而可制造出多达上千层的接近理想分布的折射率剖面。

(3) 光纤几何特性和光学特性的重复性好,适合于批量生产。对 SiCl_4 的沉积效率接近 100%,沉积速度快,有利于降低成本。

光纤预制棒的管外化学气相沉积法有两种:气相轴向沉积法(VAD)和棒外气相沉积法(OVPD)。这两种方法就原理而言是相同的,它们沉积玻璃的示意图如图 1-3-6 所示。VAD 法制作光纤预制棒的过程是把经过提纯的化学试剂,如 SiCl_4 、 GeCl_4 、 SiHCl_3 等以气态送入氢氧火焰喷灯,使之在氢氧火焰中水解,生成石英玻璃微粒粉尘。这些粉尘被吹附在种子石英棒的下端并沉积下来,这样沿轴向就生长出由玻璃粉尘组成的多孔粉尘预制棒,这种多孔粉尘预制棒被向上提升,通过一管状的加热器,被烧结处理,熔缩成透明的光纤预制棒。

VAD 法的特点是:

(1) 靠大量的载送化学试剂的气体通过氢氧火焰,大幅度地提高了氧化粉尘的沉积速度,比 MCVD 法快 5~10 倍。

(2) 一次性形成相当于纤芯和包层组成的粉尘棒,然后分段熔融,并通入氩气、氯气

以及氯化亚砷(SOCl_2)进行脱水处理,使光纤玻璃中 OH^- 含量很低,适合于制造长波长低损耗光纤。

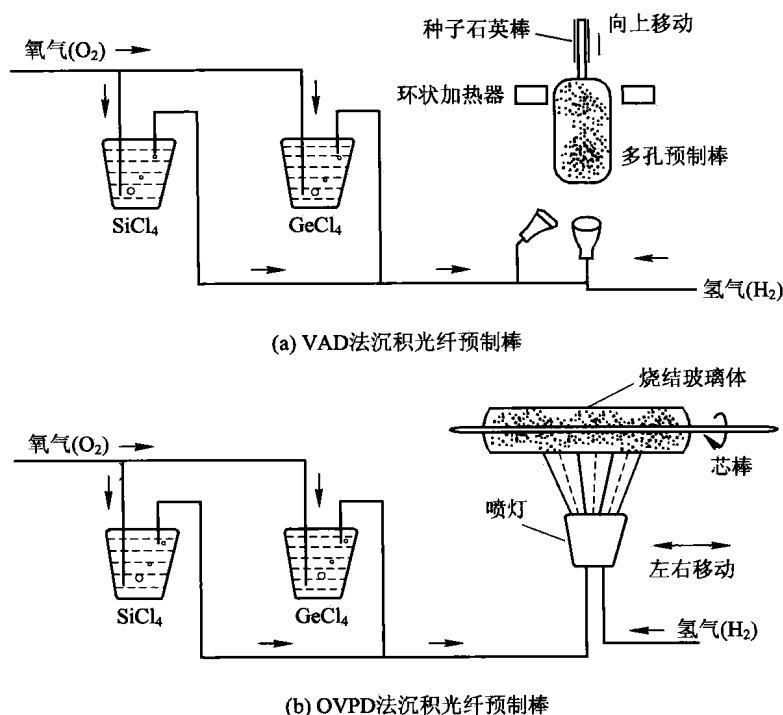


图 1-3-6 光纤预制棒的管外化学气相沉积法示意图

OVPD 法的沉积顺序与 MCVD 法相反,它先沉积芯层,后沉积包层。如果芯棒是一根合成的高纯石英玻璃,则只需沉积包层材料,最后的工艺是把沉积的疏松的管棒材放入烧结炉中进行脱水处理,烧结成透明的预制棒。该方法的优点如下:

- (1) 能生产出大型的预制棒。
- (2) 不需要高质量的石英管做套管。
- (3) 棒芯中杂质含量极低。
- (4) 几何尺寸精度高。
- (5) 能大规模生产,成本低。

2) 光纤的拉制工艺

将光纤预制棒拉制成光纤的示意图如图 1-3-7 所示。预制棒由送料机构以一定的速度均匀地送往管状加热炉中,预制棒尖端热到一定温度时,棒体尖端的粘度变低,靠自身重量逐渐下垂变细而成纤维,该纤维被拉引到牵引辊绕到卷筒上,在一定的牵引速度下拉制出所要求的光纤。在拉丝过程中,纤维丝径由激光线径测量仪监测,并利用监测结果控制拉丝速度及送料速度,以得到合格的产品。由预制棒拉制成的光纤的截面折射率分布可以完全保持预制棒原有的折射率分布,这是因为玻璃中的分子扩散要比晶体中的难得多,即使使用 2000°C 的高温去熔融预制棒,已掺入棒体中的掺杂物质也不会扩散,仍保持原预制棒中折射率分布。

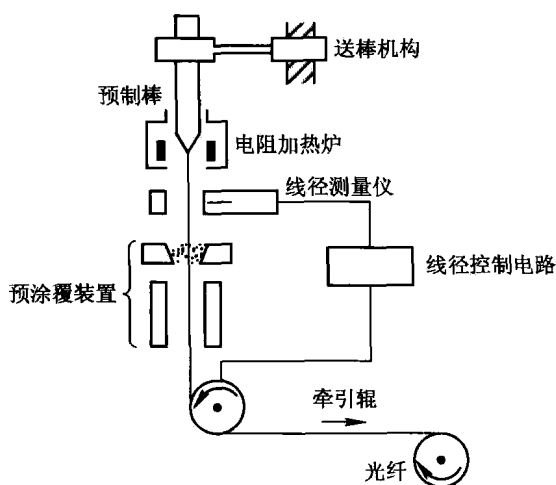


图 1-3-7 光纤拉丝工艺过程示意图

3) 光纤的涂覆和套塑工艺

从预制棒拉出的光纤不能直接使用，这是因为它达不到实际使用的强度要求。玻璃与金属不同，它是脆性断裂材料，其抗拉和抗弯能力都较差，实际拉出的光纤由于制造工艺的不完善，强度将进一步下降。制造中造成强度下降的主要原因如下：

(1) 预制棒在制造中可能存在杂质和气泡，这些杂质和气泡会转移到光纤中。由于杂质的膨胀系数与周围玻璃不同，可能导致裂纹，造成强度的下降；气泡对强度的影响将更大。

(2) 拉丝过程中，拉丝炉的温度稳定性、周围环境中的粉尘及拉丝卷绕等有可能使光纤表面出现划痕、裂纹等机械损伤，影响光纤的强度。拉出的光纤如果直接使用，除会造成进一步机械损伤外，周围环境中的水分等有害物质还会对光纤造成腐蚀，使光纤表面的裂纹扩展，降低光纤强度。

总之，直接拉出的光纤的抗拉能力只有 100 g 左右，无法使用。因此，为保护光纤表面，提高抗拉强度和抗弯曲强度，还要对光纤进行涂覆和套塑处理。

光纤的涂覆是与拉丝工艺同时进行的。当光纤向下拉制时，光纤表面的微裂纹尚未与空气中水分等发生反应或扩大，就迅速地进行涂覆来保护光纤的表面。涂覆材料一般是硅酮树脂和丙烯酸脂类材料，图 1-3-8 为光纤的硅酮树脂涂覆工艺示意图。通常涂覆都在两层以上，里面的一层采用折射率比石英玻璃稍大的变性硅酮树脂，可以用来吸收透过包层的光，涂覆厚度一般为 $30 \sim 150 \mu\text{m}$ ；外面的第二层是普通的硅酮树脂，而且涂层较厚。

两次涂覆后的外径约为 $0.8 \sim 0.9 \text{ mm}$ ，有利于提高光纤的低温性能和抗微弯性能。两次涂覆中涂覆

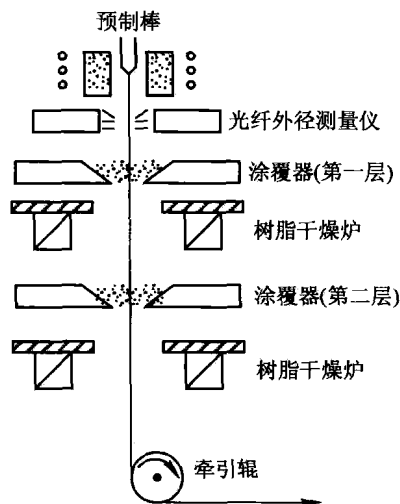


图 1-3-8 光纤的涂覆工艺示意图