



光缆通信系统

Youdian Gaodeng Xuexiao Zhuanke Jiaocai

邮电高等学校专科教材

纪越峰 顾晚仪 李国瑞 编著



人民邮电出版社

邮电高等学校专科教材

光缆通信系统

纪越峰 顾皖仪 李国瑞

编 著

人民邮电出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

光缆通信系统 / 纪越峰等编著. — 北京: 人民邮电出版社, 1994.10

邮电高等学校专科教材

ISBN 7-115-05274-3

I. 光… II. 纪… III. 光缆通信-通信系统-高等学校-教材 IV. TN929.11

~~邮电高等学校专科教材~~

光缆通信系统

纪越峰 顾晓仪 黎国瑞 编著

~~人民邮电出版社出版~~

北京朝阳门内南竹杆胡同111号

人民邮电出版社河北印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经售

*

开本: 850×1168 1/32 1994 年 10 月第一版

印张: 11.5 1994年10月第1次印刷

字数: 304千字 插页: 1 印数: 1-3 000 册

ISBN7-115-05274-3/TN·722

定价: 8.50元

内 容 提 要

本书由邮电部高等学校通信工程专业教学指导委员会评审并推荐的。

全书共分九章。系统地介绍了光缆通信系统的原理和技术，内容不仅包括光纤（光缆）、光发射端机和光接收端机等基础知识，而且还涉及了系统的组成、设计、施工、测试、验收和维护等实用技术，另外，对光纤通信网和新型光纤通信系统也做了简述。全书取材广泛，图文并茂，层次清楚，实用性强。

本书为邮电高等学校光纤通信专业的专科教材，还可供通信类本科学生和从事通信的工程技术人员学习和参考。

本书是在1991年8月和1992年6月印行的讲义基础上改编而成的，虽然已历经两版，但由于作者水平所限，不足之处，恳请同行和读者指正。

作 者

1994年3月

目 录

绪论	(1)
第一章 光纤和光缆	(4)
第一节 光纤的基本性质	(4)
第二节 光纤的传输模式	(14)
第三节 光纤的传输性质	(20)
第四节 单模偏振光纤	(29)
第五节 光缆	(33)
本章小结	(38)
思考和练习题	(38)
第二章 光发射端机	(41)
第一节 光源	(42)
第二节 线路编码	(58)
第三节 激光器的瞬态性质和驱动电路	(71)
第四节 激光器的温度性质与控制电路	(81)
本章小结	(94)
思考和练习题	(96)
第三章 光接收机	(100)
第一节 光电检测器	(101)
第二节 噪声与灵敏度	(109)
第三节 放大电路	(122)
第四节 均衡电路和再生电路	(137)

第五节 光接收机电路实例·····	(146)
本章小结·····	(149)
思考和练习题·····	(150)
第四章 光缆通信系统·····	(152)
第一节 光缆通信系统的基本组成·····	(152)
第二节 光缆通信同步数字系列简介·····	(159)
第三节 光缆通信系统的全程全网形式·····	(166)
第四节 光缆通信系统的性能参数·····	(169)
第五节 光缆通信系统的性能规范·····	(184)
本章小结·····	(195)
思考和练习题·····	(195)
第五章 光缆通信系统的设计和施工·····	(198)
第一节 光缆通信系统的设计·····	(198)
第二节 光缆通信系统的施工·····	(216)
本章小结·····	(219)
思考和练习题·····	(220)
第六章 光缆通信辅助系统·····	(222)
第一节 监控管理系统·····	(222)
第二节 公务通信系统·····	(227)
第三节 区间通信系统·····	(231)
第四节 自动倒换系统·····	(235)
第五节 告警处理系统·····	(241)
第六节 电源供给系统·····	(244)
第七节 辅助信号的传输方式·····	(249)
本章小结·····	(255)
思考和练习题·····	(257)

第七章 光缆通信系统的测试、验收与维护..... (258)

第一节 常用仪表..... (258)

第二节 光缆通信系统的测试..... (266)

第三节 光缆通信系统的工程验收..... (285)

第四节 光缆通信系统的维护..... (290)

本章小结..... (305)

思考和练习题..... (305)

第八章 光纤通信网..... (307)

第一节 光纤局部区域网..... (307)

第二节 综合业务数字网..... (320)

第三节 应用实例..... (324)

本章小结..... (327)

思考和练习题..... (328)

第九章 新型光纤通信系统..... (330)

第一节 光波复用系统..... (330)

第二节 副载波复用系统..... (336)

第三节 相干光通信系统..... (342)

第四节 超长波长光通信系统..... (347)

第五节 全光通信系统..... (350)

第六节 光孤子通信系统..... (354)

本章小结..... (357)

思考和练习题..... (358)

主要参考资料..... (359)

绪 论

1970年,美国康宁公司生产出了每公里衰减为20dB的光导纤维(简称光纤),同年美国贝尔实验室实现了GaAlAs半导体激光器室温下的连续工作。由于这两项重要的科研成果,从而揭开了光纤通信的序幕,一种崭新的通信方式也由此诞生,并在以后的二十多年里以极其惊人的速度向前发展,目前已遍及全球。

一、光纤通信系统的历史、现状和前景

回顾光纤通信系统的发展历史,1973~1976年的短波长($0.85\mu\text{m}$)多模光纤通信系统被认为是第一代光纤通信系统;1976~1982年的长波长($1.3\mu\text{m}$)多模和单模光纤通信系统构成了第二代光纤通信系统;目前已发展到第三代,它是以长波长($1.31\mu\text{m}$ 和 $1.55\mu\text{m}$)、高速率($140\sim 565\text{Mbit/s}$)和长距离(50km 左右)为主要特征;在以后的几年内,将出现第四代光纤通信系统,它包括了一些更先进的系统,如:超高速系统、光波复用系统、相干光通信系统、全光通信系统等。这四代光纤通信系统的形成主要反映了在各个时期内光纤通信技术的发展水平和社会上信息交换的需求程度,随着信息社会的到来,各种各样信息交换量的与日俱增,一些更新、更好的光纤通信的换代系统还将会不断涌现。

从1976年美国亚特兰大市率先采用光纤通信系统为市内电话中继服务开始,到目前不足20年的时间里,全球范围内的光纤通信系统发展迅猛。有代表性的如:全长达3400km横贯日本南北的大干线,大西洋和太平洋海底光缆传输系统、法国比亚里茨的“光纤城”等。从商业角度来看,自1980年以来,光纤通信产生以年增长

率30%的速度在发展, 1991年全世界与光纤通信系统有关的产品销售额为38亿美元, 预计到1997年将达到100亿美元, 在21世纪 将成为世界主要产业之一。从系统发展的趋势来看, 有四点应引起我们的注意, 即从短波长($0.85\mu\text{m}$)向长波长($1.31\mu\text{m}$ 和 $1.55\mu\text{m}$)发展; 从多模光纤系统向单模光纤系统发展; 从低速系统向高速系统发展; 从点到点的系统向光纤用户网发展。

我国早在1974年即开始研究光纤通信技术, 1979年建成了第一条商用(北京86~89分局)光缆中继系统, 随后, 武汉—荆州—沙市, 南京—武汉—重庆, 合肥—芜湖等一系列有代表性的光纤通信系统相继问世。经过近20年的努力, 目前我国已形成了相当的规模, 全部掌握了四次群(140 Mbit/s)以下光纤通信系统的研制、生产、施工、维护及使用等全套技术, 与之配套的各种测试仪表也已批量投产, 565 Mbit/s 系统已开始运行。从1991年起, 邮电部已决定今后不再建设长途电缆通信系统, 而大力发展光纤通信技术, 计划在八五期间将逐步建设含有22条光缆干线、总长度达32000 km的大容量光纤通信干线传输网, 将除台湾和西藏以外的所有省、市、自治区联接起来, 形成一个畅通无阻的传输通道。另外, 在光纤通信的应用基础理论、基础材料、新型系统等方面也已取得了很大的进展。

二、光纤通信系统的基本构成

强度调制—直接检波的光纤通信系统的基本构成框图如下图所示, 它是由光发射端机、光纤(光缆)和光接收端机组成, 图中的

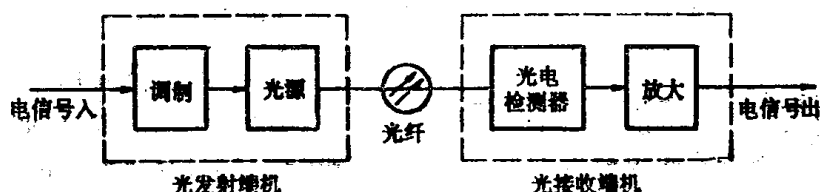


图 0-1 光纤通信系统基本构成

输入电信号既可以是模拟信号（如视频信号），也可以是数字信号（如PCM信号），光源（发光二极管或半导体激光器）通过调制器将输入的电信号变成相应的光信号送入光纤。光纤作为一种传输媒介将以极小的衰减传送这种已调光信号。在接收端的光电检测器（PIN光电二极管或APD雪崩光电二极管）将对输入的光信号进行直接检测，将其转变为相应的电信号，再通过放大等手段，以弥补线路传输过程中的能量损耗和波形畸变，最后输出和原始信号一致的电信号，从而完成整个传输过程。

光纤通信系统的主要特点是：

1. 通信容量大、传输距离远。
2. 光纤尺寸小、重量轻，有利于敷设和运输。
3. 抗电磁干扰。尤其适用于有强电干扰和电磁辐射的环境中。
4. 信号串扰小，保密性强。
5. 节约有色金属。

第一章 光纤和光缆

本章将主要介绍光纤的基本性质、传输模式、传输性质、单模偏振光纤以及光缆的相关知识。

第一节 光纤的基本性质

本节介绍的光纤基本性质包括光纤的结构、分类、导光原理以及基本的制作工艺。

一、光纤的结构和分类

光通信中使用的光纤是横截面很小的可挠透明长丝，它在长距离内具有束缚和传输光的作用。

1. 光纤的结构

图 1.1-1 是光纤的横截面图，它主要由纤芯、包层和涂敷层构成。最里面的为光纤纤芯，是由高度透明的石英玻璃制成，其芯

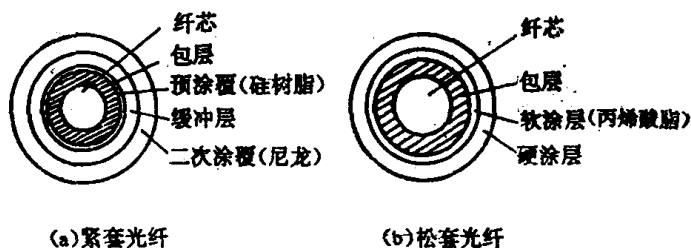


图 1.1-1 套塑光纤结构

径为 $4 \sim 100\mu\text{m}$ ；包层的折射率略小于纤芯，从而造成一种光波导效应，使大部分的光信号被束缚在纤芯中传输，包层的外径为 $125 \sim 140\mu\text{m}$ ；一次涂敷层（也称预涂层）厚度为 $5 \sim 40\mu\text{m}$ ，其作用是保护光纤，增加韧性；缓冲层厚度为 $100\mu\text{m}$ 左右，其作用是减小对光纤的压力；二次涂敷层（也称套塑层）可分为紧套和松套两种，主要作用是保护光纤。

2. 光纤的分类

依据不同的原则可有不同的分类方法。

（1）按照光纤的原材料分类：①石英系光纤。它主要是由高纯度的 SiO_2 并掺有适当的杂质制成，其特点为：损耗最低，强度和可靠性最高，应用最广泛，但价格也最贵。②多组份玻璃纤维。例如，用钠玻璃掺有适当杂质制成，其特点为：损耗较低，可靠性不高。③塑料包层光纤。它主要是由石英玻璃制成纤芯，硅树脂制成包层的一种混合结构。④全塑光纤。纤芯和包层均由塑料制成，从而使造价大幅度下降，但损耗较大，可靠性也不高。

所以，目前光纤通信中主要用的是石英光纤。

（2）根据光纤横截面上折射率分布来分类：①阶跃折射率型。纤芯中折射率分布是均匀的，在纤芯和包层的界面上发生突变。②渐变（梯度）折射率型。纤芯中折射率是连续变化的。

（3）以光纤中的传输模式数量来分类：①多模光纤。可传输许多种模式。②单模光纤。只能传输一种模式。

这里所说的模式指的是电磁场的分布形式，一种模式对应于一种电磁场的分布形式。

（4）常用光纤：目前常用光纤有三种类型。多模阶跃光纤，多模渐变（梯度）光纤和单模光纤。图 1.1-2 是这三种光纤的示意图。

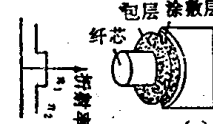
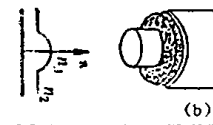
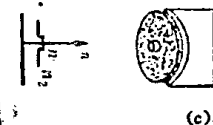
光纤类型与折射率分布、光的传输	芯径 (μm)	包层直 径(μm)	折射率	接续和成本
 (a) 多模阶跃折射率光纤	50	125	n_1 (纤芯) n_2 (包层)	接续较易 成本费最小
 (b) 多模渐变折射率光纤	50	125	$n_1[1 - 2\Delta(\frac{r}{a})^2]^{\frac{1}{2}}$ (纤芯) n_2 (包层)	接续较易 成本费最大
 (c) 单模阶跃折射率光纤	<10	125	n_1 (纤芯) n_2 (包层)	接续较难 成本费较小

图 1.1-2 三种主要类型的光纤

二、光纤的导光原理

分析光纤的导光原理可以采用两种方法：①射线理论法。当光波长与光纤尺寸相比很短时，可把光波看作“光线”来处理，从而使分析问题显得简单、直观，这种方法主要适用于多模光纤。②波动理论法。由于光波属于电磁波，所以可按电磁波理论进行分析，这种方法全面、精确，但较繁琐，主要适用于单模光纤。

在光纤中传输的光线，按其传播路线的不同可分成两大类——子午光线和斜射线：①一般将通过光纤轴线的平面称作子午面，而把在传输过程中总是位于子午面内的光线称之为子午光线。②把传输过程中不通过光纤轴线的光线称之为斜射线。

1. 多模阶跃光纤的导光原理

分析方法可采用射线理论法。为简单起见，可从子午光线入手。

由于空气和光纤的折射率不同，光的射线从空气进入光纤后，

将改变方向，这称为折射。如图 1.1-3 所示，光从空气入射于光纤的角度为 θ_0 ，到达光纤后射线的角度将为 θ ，这些角度都是射线与界面垂直线所成的角，根据斯涅尔定律

$$n_0 \sin \theta_0 = n_1 \sin \theta,$$

或 $\sin \theta_0 = n_1 \sin \theta \quad (1.1-1)$

因 n_1 大于 1， $n_0 = 1$ ，故 $\theta < \theta_0$ 。这是由空气入射于光纤的情况。另一种情况，即光的射线从纤芯射至与包层的界面处的情况，如图 1.1-4 (a) 所示，从纤芯入射于包层界面的角为 θ_1 ，到包层后射线的角为 θ_2 ，故有

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \quad (1.1-2)$$

因 $n_1 > n_2$ ，故 $\theta_1 < \theta_2$ 。当 $\theta_2 = 90^\circ$ 时，如图 1.1-4 (b) 所示，光不进入包层而在界面掠射，此时处于临界状态，光从纤芯入射于界面的角称为临界角 $\theta_1 = \theta_k$ ，这时 $\sin \theta_k = n_2/n_1$ 。

当 $\theta_1 > \theta_k$ 时，如图 1.1-4 (c) 所示，光从纤芯入射于界面，再从界面返回至纤芯，这就是全内反射，这时，纤芯与

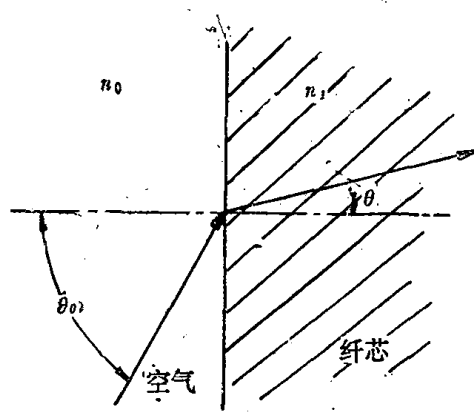


图 1.1-3 光的折射

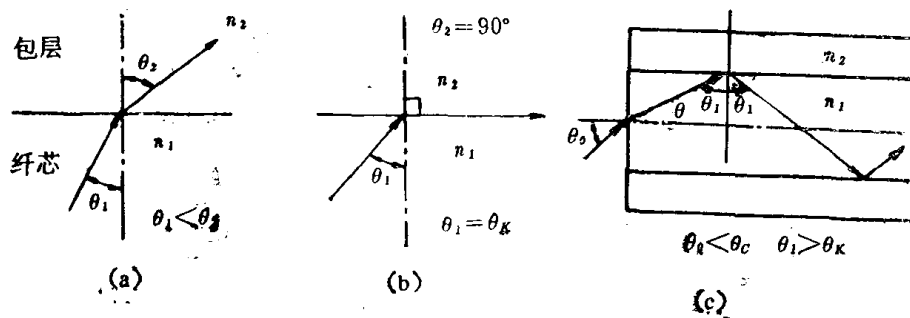


图 1.1-4 光信号传输原理图

包层的界面就好象抛光的金属面一样。

现在，希望光纤中传播的射线在纤芯和包层界面处发生全反射，就要求入射至界面的角度大于临界角， $\theta_1 > \theta_k$ ，因 $\theta + \theta_1 = 90^\circ$ ，即 θ 应小于 $90^\circ - \theta_k$ ，也就是要求光从空气入射于光纤的角度小于临界情况时的入射角 θ_c ， $\theta_o < \theta_c$ 。

$$\begin{aligned}\sin\theta_o &= n_1 \sin(90^\circ - \theta_k) \\ &= n_1 \cos\theta_k \\ &= n_1 \sqrt{1 - \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2} \\ &\approx n_1 \sqrt{2\Delta}\end{aligned}\quad (1.1-3)$$

这里的 $\Delta = \frac{n_1 - n_2}{n_1}$ 称之为纤芯和包层的相对折射率差。所以，光从空气入射于光纤的角 θ_o ，只有小于这临界值 θ_c ，才可能在纤芯与包层的界面发生全反射并沿纤芯向前传播。如果入射角大于此值，射线将进入包层，不再成为有用的传播。这个临界值 θ_c 称为最大入射角 ($\theta_{\max}$)，它的正弦称为数值孔径 (NA)。

$$NA = \sin \theta_{\max} = n_1 \sqrt{2\Delta} \quad (1.1-4)$$

如 $n_1 = 1.5$ ， $\Delta = 0.01$ ，则 $NA = 0.2$ 。由此可见，数值孔径 (NA) 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折射率，而不依赖于光纤纤芯和包层的直径。

光纤的数值孔径表示了光纤接收入射光的能力，NA 越大，即 $\theta_{\max}$ 越大，则光纤接收光的能力也越强，从立体的角度来看， $2\theta_{\max}$ 是一个圆锥角，从光源发出的光，只有入射在该圆锥内的光才能在光纤中形成全反射而向前传播，因此从增加进入光纤的光功率的角度来看，NA 越大越好，但 NA 太大时，光纤的多模畸变加大，影响光纤的带宽。因此，在光纤通信系统中，对 NA 的数值有一定的要求，据 ITU-T (原 CCITT) 的建议：NA 应为 $(0.18 \sim 0.24) \pm 0.002$ 。对某些特种用途的光纤，NA 可以大些。

2. 多模渐变光纤的导光原理

多模渐变光纤的折射率在纤芯中是连续变化的, 其分布为

$$n(\bar{r}) = \begin{cases} n_1 \left[1 - 2\Delta \left(\frac{r}{a} \right)^g \right]^{\frac{1}{2}} & 0 \leq r \leq a \\ n_2 & a < r \leq b \end{cases} \quad (1.1-5)$$

其中, n_1 为纤芯的折射率; $\Delta = \frac{n_1 - n_2}{n_1}$ 为相对折射率差; g 为分布指数 (当 $g \rightarrow \infty$ 时, 变为阶跃分布; 当 $g = 2$ 时, 变为抛物线分布); n_2 为包层的折射率。

下面采用射线理论, 重点讨论一下子午光线的传播轨迹。

可先从射线方程入手:

$$\frac{d}{ds} \left(n \frac{d\mathbf{r}}{ds} \right) = \nabla n \quad (1.1-6)$$

其中 $\mathbf{r}$ 为轨迹中某一点的位置矢量, ds 为沿轨迹的距离单元, ∇n 为折射率的梯度。

在圆柱坐标系下, 并只考虑近轴子午光线, 则上式可简化为:

$$\frac{d^2 r}{dz^2} = \frac{1}{n} \frac{dn}{dr} \quad (1.1-7)$$

其中 r 为径向变量; z 为轴线方向。

当 $g = 2$ 时, 将(1.1-5)式代入(1.1-7)式可得:

$$\frac{d^2 r}{dz^2} = - \frac{2\Delta r n_1^2}{a^2 n^2} \quad (1.1-8)$$

对近轴光线, $n_1 \approx n$, 所以上式可近似为

$$\frac{d^2 r}{dz^2} \approx \frac{2r}{a^2} \cdot \Delta \quad (1.1-9)$$

设 $z = 0$ 处, $r = r_0$, $\frac{dr}{dz} = r'_0$, 则解为