

张 煦 著

光纤通信原理

GUANGQIAN
TONGXIN YUANLI

(修订本)

I4

上海交通大学出版社

内 容 简 介

本书全面介绍光纤通信系统各组成部分的原理,分章阐述光纤光缆、光源和驱动、光检测和放大、数字系统和模拟系统、光纤参数测量、光纤通信技术新进展等。

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

0015/33 15

光纤通信原理(第二级修订本)

上海交通大学出版社出版

(淮海中路1984弄19号)

新华书店上海发行所发行

浙江上虞汤浦印刷厂排版

江苏太仓印刷厂印装

开本 850×1168 毫米 1/32 印张 10,625 字数 271 000

1988年12月第1版 1989年2月第1次印刷

印数: 1—2,250

ISBN 7-313-00336-6/TN·913

科技书目: 184-234

定 价: 2.40 元

《光纤通信原理》

主编人简介



张煦,1913年11月生于江苏无锡,1934年交通大学毕业,1940年哈佛大学科学博士。现任上海交通大学教授,电子工程名誉主任,《通信与电子系统》国家重点学科博士点导师,《光纤通信技术》国家重点实验室学术带头人。中国科学院学部委员,获1988年科学院颁发从事科学工作五十年荣誉奖状;国家科委、计委、经委颁发对通信技术政策研究做出突出贡献的表彰证书和奖品;中国电子学会发给对过去五十年为中国电子事业做出贡献的荣誉证书。上海通信学会连任名誉理事长,在连续三届年会上作大会学术报告。最近出版《光纤通信系统》和再版《光纤传输系统设计》二书,1988年在国内外各种杂志发表文章12篇。

前 言

光纤通信是七十年代的新兴技术，它以飞跃般的速度不断向前推进，越来越显示出它的优越性能和实用价值。光纤通信先是用短波长 $0.85\mu\text{m}$ ，近来发展用更好的长波长 $1.3\sim 1.55\mu\text{m}$ ，光纤损耗从 4dB/km 减至 $0.5\sim 0.2\text{dB/km}$ 。光纤又将从多模演变至单模，色散近于零。半导体器件也相应完善，激光管、发光管在短波长和长波长分别用 AlGaAs 和 InGaAsP ，光电管和雪崩管用 Si 、 Ge 和 InGaAs 。光纤系统主要应用于数字传输，PCM 先是用码速 $30\sim 50\text{Mb/s}$ ，近来发展用 $140\sim 500\text{Mb/s}$ 。在公用通信网的应用方面，先是用于市话局间线路，近来推广至长途线路和海底线路。在专用通信系统中，例如电力、电气铁道、广播电视、大企业内部、船舶飞机内部，光纤用于模拟电视传输和数据传输极为适宜。可以认为，光纤通信即将成为现代通信网的主要传输手段，光缆代替电缆已成定局。

为了适应这种新兴技术的急剧进展，上海交通大学电子工程系首先对大学生开出《光纤通信》课程，1979年油印《光纤通信基本原理》讲义，其后充实内容，于1981、1983年两次重印《光纤通信原理》讲义。为了适应兄弟院校和工厂、研究所的需要，现把这本讲义修订后出版。全书分六章，在第一章概述之后，各章分别阐述光纤和光缆、光源和驱动、光检测和放大、光纤传输系统、光纤参数测量等原理。上海交通大学开设这门课已五年，历届同学都表示容易接受。对于外校考入的、没有学过光纤通信而愿意在这方面从事研究的研究生，我们也曾利用这本讲义，通过讨论方式上课，效果良好。现在，上海交通大学出版社出版这本书，完整地介绍光纤通信的原理，供全国兄弟院校有关通信和电子系统的专业开课时选用。由于此书易于阅读，对于工厂和研究所从事光纤通信工

作的技术人员,同样有参考价值。

本书的出版,祈能为广大读者提供现代光纤通信的基本知识,促使我国的通信建设朝向现代化飞跃前进。书中不足之处,请读者们指出,以便继续改进。

张 煦

1983年8月1日于上海交通大学电子工程系

再版前言

回忆 1979 年,在上海交通大学电子工程系首次对四年级学生开设光纤通信这门课,随即编写《光纤通信原理》一书,1983 年承上海交通大学出版社接受出版,供国内高等院校研究所和工厂的科技人员阅读和使用,现已过去近三年了。

这几年来,光纤通信技术已有急剧的进展,虽基本原理没有实质性的改变,但其技术的内容范围扩大了,重点也有所变迁,这是显而易见的。例如从短波长 $0.85\ \mu\text{m}$ 过渡至长波长 $1.3\ \mu\text{m}$ 和 $1.55\ \mu\text{m}$,从多模光纤过渡至单模光纤,从 AlGaAs 过渡至 InGaAsP,这都是人所共知的事实。随着时代的推移,光纤通信技术的应用将越来越普遍,范围将越来越广泛,数字码速也将不断提高,中继距离也将不断延长。

对此,我们认为有必要在本书原来六章的基础上,增加“光纤通信技术新进展”的内容作为第七章。此章取材于在 1986 年全国光纤通信学术会议上作者所作的“八十年代中期世界光纤通信技术水平和趋向评述”的大会报告,并吸收美国贝尔研究院光纤专家 S.D. Personick 博士于 1985 年出版的 *Fiber Optics, Technology and Applications* 一书的部分论点。

这新增的一章着重地介绍了单模光纤设计(包括色散移位光纤)、长波长光子器件(包括单频激光管)、系统交互作用噪声、数字传输系统估算比较、模拟系统特点、数据系统特点、光纤局部地区网、波分复用光纤通信、相干光纤通信和非通信的光纤传感系统等。后四种是近年的新兴技术,颇有发展前途。

由于光纤通信技术发展迅速,编写光纤通信的书,不仅希望尽快出版问世,还必须每隔一短时期,例如三年补充必要的新知识,以期跟上形势,适合读者的需要。

本书编写的内容如有不足之处，恳请读者惠予指教，定当不断改进，力求完善。

张 煦

1986年11月于上海交通大学

目 录

第一章 概述	1
§1-1 引言	1
§1-2 光纤	3
§1-3 光器件	5
§1-4 光系统	8
§1-5 结语	11
第二章 光纤和光缆	15
§2-1 引言	15
§2-2 光纤中射线传播	16
§2-3 光纤中模式传播	24
§2-4 光纤的损耗特性	32
§2-5 光纤的色散特性	38
§2-6 实用光纤举例	47
§2-7 光纤连接器	51
§2-8 光缆的机械考虑	53
§2-9 光缆结构举例	55
§2-10 结语	58
第三章 光源和驱动	61
§3-1 引言	61
§3-2 激光的优越特性	64
§3-3 产生激光的物理原理	67
§3-4 激光管结构和特性	74
§3-5 发光管结构和特性	80

§3-6	光源的辐射图形	86
§3-7	光源与光纤的耦合	88
§3-8	驱动和偏置电路	93
§3-9	实用光发送机举例	99
§3-10	结语	102
第四章	光检测和放大	104
§4-1	引言	104
§4-2	光检测器的物理原理	105
§4-3	光检测器的电路模型	114
§4-4	光检测器的信噪比性能	117
§4-5	光检测-放大器的信噪比	122
§4-6	低噪声预放大器	131
§4-7	数字脉冲的时延均衡	137
§4-8	误码率计算	141
§4-9	实用光接收机举例	144
§4-10	结语	152
第五章	光纤传输系统	154
§5-1	引言	154
§5-2	调制	155
§5-3	线路编码和再生中继	164
§5-4	损耗和脉冲时间分配	168
§5-5	传输距离和信息容量	174
§5-6	模拟通信系统考虑	177
§5-7	数字通信系统考虑	181
§5-8	实验光纤系统参数测量	191
§5-9	多端分布系统	197
§5-10	集成光路应用	202
§5-11	结语	209

第六章 光纤参数测量	211
§ 6-1 引言	211
§ 6-2 光纤损耗测量	212
§ 6-3 光纤色散测量	220
§ 6-4 其它测量	225
§ 6-5 结语	226
第七章 光纤通信技术新进展	228
§ 7-1 引言	228
§ 7-2 单模光纤设计和性能	230
§ 7-3 长波长与短波长光子器件比较	240
§ 7-4 光纤系统交互作用噪声	257
§ 7-5 光纤数字传输系统估算	262
§ 7-6 光纤模拟系统性能	270
§ 7-7 光纤数据线路特点	275
§ 7-8 光纤局部地区网	279
§ 7-9 波分复用光纤通信	285
§ 7-10 相干光纤通信	288
§ 7-11 光纤传感系统	297
§ 7-12 结语	302
参考文献	304
专业名词英汉对照表	316

第一章 概述

§ 1-1 引言

光通信分为无线光通信和有线光通信两类，正象电信分为无线电信和有线电信两类一样。无线光通信是发收两端相隔可视距离作相互通信，发端设置激光器，例如二氧化碳(CO₂)气体激光器，发出一定功率的光波，波长10μm；收端设置光检测器，中间媒质为大气，所以它常称大气光通信。由于大气吸收光能，光传输随气候相应变化，这种通信不十分可靠，通信距离受限制。只有在深空间，那里几乎是真空，不吸收光能，且空间中很少障碍，无线光通信是非常有效的。所以，利用激光器的无线光通信在宇宙空间通信大有发展前途。

至于陆地和海底能够适合实用的光通信，将采取另一种方式。发收两端分别设置半导体光源和光检测器，传输媒质是玻璃纤维，即所谓光纤，且由若干对光纤组合成为光缆，传输途径中间设置中继站，光波波长在1μm附近，相当于频率300THz(10¹²Hz，即兆兆赫)。这是有线的通信，称为光纤通信，或光缆通信。由于光纤工艺大大改进，光纤传输损耗降至10dB/km以下，又由于激光技术和半导体器件的迅猛发展，这种光纤通信的现实意义已被肯定。近几年来，大量实践证明，光缆通信比电缆通信优越得多，预计在不久的将来，光缆有可能在陆地和海底通信中代替电缆。陆地光缆通信包括市内通信和长途通信，海底光缆通信包括沿海通信和国际通信。至于铁道通信、管道通信、矿井通信和大工厂通信、船舶和飞机内部通信用光缆代替电缆，其技术上则更为成熟，故用途非常广泛。

光纤通信的基本原理如下：

3910226

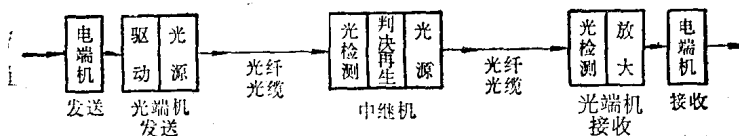


图 1-1

图 1-1 所示为光纤传输系统的基本方框图，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。中继站的设备则既包含光检测，又包含光源，把接收的光信号变换为电信号，经过判决再生的处理，又把电信号变换为光信号发送。简言之，光纤传输系统的主要组成部分是光纤和光器件，光器件主要是光源和光检测。和光系统一起装置运用的电端机和电信号处理设备，则与目前电信系统中所用的大致相同。

光纤传输系统可以用于模拟通信，也可以用于数字通信，但主要的和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系统传输至对方，但这样的实际应用仅限于市内范围的短距离电视传输。市内电话的对称电缆不可能用来传输电视节目，敷设了光缆后，可以传输模拟电视信号，电视就可以传输至用户。目前数字通信发展很快，实践证明它比模拟通信优越，而光纤系统的传输频带宽度能力大，正好适应高速率、大容量数字通信的需要。并且，急剧增涨的计算机数据通信，直接利用光纤系统很适宜。光纤数字系统如欲延长传输距离，可以考虑在线路中间设置再生中继机，如图 1-1 所示。

对于数字通信，电端机的任务，是把电话或电视的模拟信号数字化，它在发送端是通过取样、量化和编码过程，编成脉码调制(PCM)信号，再对光源进行调制。在接收端把从光检测器得到的脉码调制信号，经过解码和重建过程，恢复模拟信号。光纤传输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和长途传输的相位抖动,这点基本上和电信系统是一样的。

§ 1-2 光纤

光纤主要是用玻璃预制棒拉丝成纤维,它包含纤芯和包层,是圆柱形。纤芯直径约 $5\sim 75\mu\text{m}$,包层必须有一定的厚度,它的外直径约 $100\sim 150\mu\text{m}$,最外面是塑料,作保护用。纤芯的折射率比包层的折射率稍高,约高 1%,光波就局限在纤芯与包层的界面以内向前传播,故光纤属于光波导。一根光纤就是一个光波导。把光能从一端传播至另一端,是单方向传播。双方向通信需要两根光纤,一根传送去方向的光信号,另一根传送来方向的光信号。如纤芯直径细得与光波的波长相仿(例如纤芯直径 $5\mu\text{m}$),光波导中传播单纯,可能只有一种模式,这样的光纤称为单模光纤。如纤芯直径较大(例如纤芯直径 $50\mu\text{m}$),则光波导中可能有许多种沿不同途径同时传播的模式,这样的光纤称为多模光纤。

纤芯截面的折射率分布有两种。其一称为阶跃折射率分布,即纤芯内均匀的折射率,到了与包层的界面,突然阶跃似地降下,变为包层的折射率。在这样的光纤中,光波在纤芯与包层的界面发生全反射。多模光纤中有许多不同途径长度的全反射,它们传播速率相等,到达接收端就有不同的时延。另一种是渐变折射率分布,即纤芯轴心的折射率最大,折射率沿径向逐渐变小,到了与包层的界面,降至包层的折射率。在这样的光纤,光波在纤芯中传播不是全反射,而是产生折射,使传播途径形状近似正弦形。多模光纤中许多不同正弦形途径的长度不等,但传播速率也不等,因而到达接收端的时延几乎相等。

光纤的主要特性有两项,即损耗和色散。损耗就是光纤每单位长度的衰减,其单位为 dB/km 。色散就是到达接收端的时延差,也即脉冲展宽,其单位为 ns/km 。光纤的损耗高低影响传输距离或中继站间隔距离的远近。光纤的色散大小,影响传输码速(或频带宽

表 1.1

光 纤 损 耗			
短波长(0.8~0.9 μm)		长波长(1.2~1.6 μm)	
年 份	dB/km	年 份	dB/km
1968	1000		
1969	100		
1970	20		
1972	4		
1974	2.2		
1976	1.6	1976	0.5(1.3 μm)
		1979	0.2(1.55 μm)

度能力)或信息容量,两者都是很重要的,但光纤的飞跃发展,首先得力于它能够降低损耗。从表 1.1 看出,在 0.8~0.9 μm 波长范围内,光纤损耗自 1968 年以来逐年大幅度降低,从 1000dB/km 减至小于 10 dB/km。同时,多模光纤倾向于采用渐变折射率分布,色散从 400 ns/km 减至小于 10 ns/km。当然,高损耗光纤 100 dB/km 和阶跃折射率分布仍有实际应用,特别适用于短距离、房屋内、船舶内或飞机内通信。低损耗光纤 10 dB/km 以下和渐变折射率分布适合于中距离和市话通信使用。

自从 1976 年以来,又发现新的前景,即在较长的光波长 1.2~1.6 μm 范围内,光纤的损耗可以减得更小,小至 1 dB/km 以下。特别是在波长 1.3 μm , 损耗低至 0.5 dB/km, 而在波长 1.55 μm , 损耗低至 0.2 dB/km。1980 年,由于工艺的改进,长波长低损耗的传输窗孔打通。图 1-2 所示为光纤损耗波谱曲线从 1978 年至 1980 年的改进,如采用单模,可使长波长很宽范围内的色散近于零。这意味着,光纤在长波长使用,可以同时兼得低损耗和低色散两项优点,中继站间隔距离可以延长至 50~100 km, 码速可以增加至 1 Gb/s 以上,而且还可利用波分复用(WDM),每对光纤能够传递的信息容量大大增加。这样,光纤在长距离和大容量数字通信的实际应用变得更加有利。图 1-3 是把短波长、长波长、多模、单模、损耗、带宽综合画成一图,对应用的选择有参考意义。

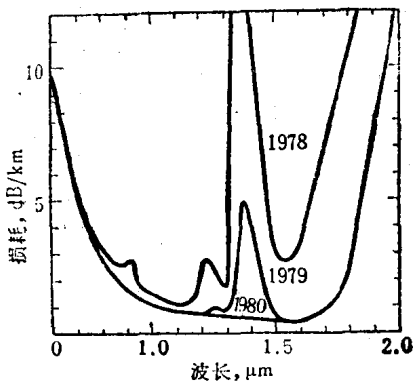


图 1-2

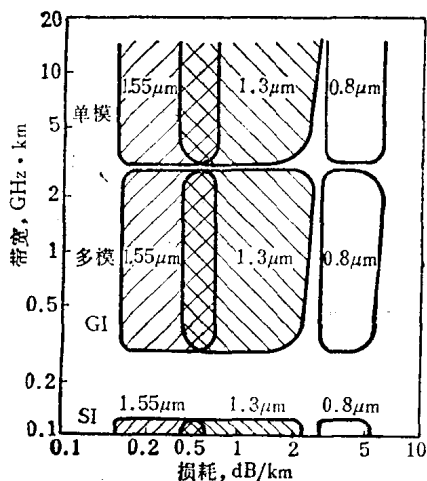


图 1-3

简言之,目前阶段光纤使用短波长 $0.8\sim 0.9\mu\text{m}$ 范围,短距离和小容量通信用高、中损耗和阶跃折射率的多模光纤,中距离和中容量通信用低损耗和渐变折射率的多模光纤。在不久的将来,光纤将使用长波长 $1.2\sim 1.6\mu\text{m}$ 范围,长距离和大容量通信用低损耗和低色散的多模和单模光纤,甚至波长划分多群复用。

§ 1-3 光器件

光器件主要是发端的光源和收端的光检测。光源的发光波长应该与光纤的低损耗波长范围相匹配,光检测的响应波长也应如此。现在,光纤的实用波长范围已明确,即短波长 $0.8\sim 0.9\mu\text{m}$ 和长波长 $1.2\sim 1.6\mu\text{m}$ 两个范围,故波长 $10\mu\text{m}$ 的二氧化碳激光器和波长 $0.6\mu\text{m}$ 的氮氛激光器都不适用。还有钕-钇铝石榴石 Nd-YAG 固态激光器,运用于波长 $1.06\mu\text{m}$ 的光辐射,驱动功率至相干光功率的效率较高,但须外加调制器。考虑到通信设备使用的器件应该体积小、重量轻、坚固牢靠,故不准备采用气体激光器或固态激光器,而是采用半导体制成光源和光检测的两种器件。现

在，用于制造光纤通信的光器件的半导体材料工艺正在不断发展。

半导体光源器件有两种：一种是发光二极管 LED，简称发光管，另一种是激光二极管 LD，简称激光管。这两种器件在短波长都是以砷化镓(GaAs)为基本材料的。它们的基本作用原理是这样的：电流把带电荷的载流子注入半导体 PN 结区，载流子的复合产生光子，发出光辐射。如果光子是自发辐射，成为非相干的光源，发出的一个光波与另一光波在空间和时间上都没有相关性。这样的光源就是发光管 LED，它的发光功率不大，波谱较宽，但结构工艺不复杂，工作寿命较长，因此它对光纤通信有很大作用。在短波长，LED 对于短距离和小容量的光纤通信，较为适宜。在长波长，目前 LED 仍有较多应用。

如果载流子复合产生光子，光子又激励载流子复合产生新光子，如此累积，总的输出将是较强的光辐射，就是所谓激光。多数的光子是受激产生和辐射的，成为相干的光源，光子是同相的，在空间和时间上都有相关性。这样的光源就是激光管 LD，它的发光功率较大，波谱较窄，但结构工艺要求高，工作寿命不长，而且它的特性随温度变化，必须采取自动控制措施。在光纤通信，激光管是关键性器件，中、长距离和中、大容量的数字通信必须利用它。在短波长 $0.8\sim 0.9\mu\text{m}$ 范围，激光管采用三元化合物 AlGaAs 的双异质结，它是注入式，需要的驱动电流不是太大，能在室温下运用，激光管的工作寿命是光纤通信技术进展的重要标志。如表 1.2 所示，AlGaAs 激光管的寿命在不到十年中有迅速的改进，现在已经超过 10^5 小时。在长波长 $1.2\sim 1.6\mu\text{m}$ 范围，发光管和激光管采用四元化合物 InGaAsP，这是最近的重要成果，但现在对 $1.55\mu\text{m}$ 还需要继续研究，在性能和寿命方面都有改进的余地。

发光管和激光管都是运用于正向偏置状态，发光功率与驱动电流的关系有一部分近于线性，因而可以直接调制。发光管可以用于模拟信号调制，也可用于数字脉冲信号调制。激光管的特性有一个明确的门限，驱动电流加偏置电流超过门限时，激光管才产

表 1.2

激 光 管 寿 命			
短波长, AlGaAs		长波长 InGaAsP	
年 份	小 时	年 份	小 时
1970	2		
1973	2×10^3		
1975	10^5		
1977	10^6	1977	6×10^3

生真正激光, 电流低于门限时, 激光管产生的是荧光。激光管主要用于数字脉冲信号调制, 正常时偏置电流近于门限值, 加上驱动脉冲电流, 就发出激光脉冲。门限值受温度影响, 所以需要自动控制, 以保证输出的光功率不随温度变化。

半导体光检测器件有两种: 一种是 PIN 光电二极管, 简称光电管, 另一种是雪崩光电二极管 APD, 简称雪崩管。在短波长 $0.8 \sim 0.9 \mu\text{m}$ 范围, 它们由硅 (Si) 半导体制成。在长波长 $1.2 \sim 1.6 \mu\text{m}$ 范围, 它们先是由锗 (Ge) 制成, 但发现暗电流太大。最近长波长 PIN 光电管和雪崩管又试用三元化合物 InGaAs/InP, 结果认为 PIN 满意, APD 却仍不合乎理想。光检测二极管运用于反向偏置状态。光电管的基本作用原理是: 在二极管的一个接触面有对光辐射透明的窗, 如进入的光子能量大于半导体的能量级, 就产生一对电子和空穴, 过渡层内的电场使电子流向 n 区, 空穴流向 p 区, 在外部电路形成电流, 这就是所谓光电流。在雪崩管中, 自由的载流子受到电场的加速而获得动能, 碰撞引起游离化, 产生新的电子-空穴对, 就是说, 进来一个光子会产生雪崩的电子和空穴, 形成很大的光电流。光电管内部没有放大, 雪崩管内部有放大作用, 多的可以放大几百倍, 好象光电倍增管。

光电管和雪崩管都要求量子效率高, 要求每一光子产生电流的效率达 50% 以上。并要求接收灵敏度高, 能在微弱的接收光功率时仍能产生有用的电流。接收端的信噪比很重要, 在收到光功率时, 光电管产生量子噪声, 而在没有接收光信号时, 光电管没有量