

数字光纤通信系统原理

赵梓森 编著

张 煦 审阅

科 学 出 版 社

1 9 8 4

内 容 简 介

本书系统地阐述数字光纤通信系统的基本理论。全书共十章，内容包括：光纤线路的传输特性、光电子器件的运用、光接收机灵敏度计算、线路码型、光纤的耦合和接续、系统工程设计等。

本书可供从事光纤通信的科技人员参考，也可供高等院校通信专业的师生参考和选修。

数字光纤通信系统原理

赵梓森 编著

张 煦 审阅

责任编辑 刘兴民

科学出版社出版

北京朝阳门内大街137号

中国科学院开封印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经销

*

1984年12月第 一 版 开本：787×1092 1/32

1984年12月第一次印刷 印张：8 1/2

印数：0001—8,300 字数：190,000

统一书号：15031·610

本社书号：3762·15-7

定价：1.35 元

前 言

光纤通信是一门新技术，是通信技术的重要发展方向。现在光纤通信已逐渐趋于成熟，开始走向实用化阶段。因此，了解光纤通信技术已成为十分迫切的问题。作者曾在国家科委举办的理论班讲授过“数字光纤通信系统”，后来就在此讲稿的基础上整理成了这本书。

本书的重点是论述光纤通信系统的基本原理，考虑到工程应用的需要，也对工程实际问题作了适当介绍。但有关制造工艺，似在实践中掌握比较好，所以本书未作详细介绍。

考虑到光波导传输理论，已有较多较好的著作可以参考，所以没有把这些内容列入本书范围，而只是从系统设计的角度出发来讨论光纤的传输问题。

对于光电子器件，我们着重介绍它的运用特性，而至于内部机理和制作工艺则未作详细介绍。

数字光纤通信系统的内容，重点在光接收机理论。现在已有许多不同的理论，本书以 S. D. Personick-CCITT 方法为主，也对其他方法作了扼要介绍。第六章叙述一种计算误码率的精确方法。这种方法并不实用，只是使读者得到一个精确的概念。阅读第六章时，应先阅读附录12的矩母函数基本知识。这部分内容带有学术评论性质，不是必须阅读的。

本书综合了整个系统设计所需要的知识。第九章、第十章叙述工程设计方法，列出了实例，便于读者掌握。这些例子都有实际依据，可供参考。

本书对绝大部分的理论公式，均有论证。但是为了避免

由于数学推导而扰乱理论的阐述，故把一些烦琐的数学推导作为附录进行介绍。

光纤通信技术尚未完全成熟，有些问题还有待进一步解决。如模式噪声、光频复用、光外差技术等还不太成熟的内容，本书中均未予以介绍。

中国科学院学部委员张煦详细审阅了本书稿，北京大学郭汝嵩、成都电讯工程学院裘明信、清华大学秦士和北京邮电学院有关同志对本书稿提出了许多宝贵意见。本书有些内容引用了武汉邮电科学研究院杨恩泽、邹林森、毛谦、林凤紫等同志的文章，特在此一并表示衷心的感谢。

由于作者的水平有限，错误难免，欢迎批评指正。

目 录

第一章	概论	1
1.1	光纤通信的发展	1
1.2	光纤光缆	2
1.3	光纤通信系统	8
第二章	光纤线路的传输特性	13
2.1	光纤的衰减	13
2.2	光纤的数值孔径	15
2.3	光纤的色散和脉冲展宽	18
2.4	光纤的带宽	26
2.5	光纤的冲激响应	28
2.6	光纤的传递函数	33
2.7	光纤链的带宽	33
第三章	光源和光检测器	35
3.1	光纤通信对光源的要求	35
3.2	激光器	36
3.3	发光管	39
3.4	PIN光电检测器	41
3.5	雪崩光电二极管	42
第四章	APD的倍增噪声及其统计特性	49
4.1	APD的倍增噪声	49
4.2	倍增的二阶矩	51
第五章	数字光接收机灵敏度计算	59
5.1	光接收机模型	60
5.2	光接收机的倍增噪声	62
5.3	放大器噪声	68

5.4	波形参数和曲线	72
5.5	光接收机灵敏度	81
5.6	最佳倍增和阈值	85
5.7	暗电流和直流光的影响	88
5.8	PIN光接收机	93
5.9	数值例子	94
5.10	Personick-CCITT改良法	97
5.11	计算光接收机的通用曲线	104
5.12	计算机辅助计算	115
5.13	光接收机的放大量和等效输入噪声	124
5.14	检测器和放大器参数对灵敏度的影响	129
5.15	量子极限	135
第六章	光接收机的其他理论	137
6.1	计算光接收机误码率的精确方法 ——Gram-Charlier级数法	137
6.2	Chernoff界限法求误码率	152
6.3	Raymond方法求误码率	157
6.4	Goell 方法计算光接收机灵敏度	158
6.5	Smith 近似	160
第七章	线路码型	162
7.1	光纤通信常用线路码型	163
7.2	编译码器	169
7.3	误码检测方法	173
7.4	线路码型的参数和性能	182
第八章	光纤的耦合和接续	185
8.1	光纤与光源的耦合	185
8.2	光纤的接续	189
第九章	数字光纤通信系统的工程设计和实例	196
9.1	传输距离的估算	196
9.2	实例: 8448kb/s 光纤传输系统	205

9.3 长波长34Mb/s 光纤传输系统方案	211
第十章 实用化系统的若干问题	220
10.1 实用化系统的要求	220
10.2 系统测试和调整	224
附录	232
参考文献	260

第一章 概 论

1.1 光纤通信的发展

光实质上是电磁波。因为光的频率很高，所以很早就有人想利用光进行大容量的通信。但由于当时没有合适的光源和光的高速调制方法，所以在那时，光通信还不能实现。

1960年，麦曼 (Maiman) 发明了红宝石激光器，相继又出现了气体激光器。激光是一种光谱很纯的单色光。这种光相干性好、能量集中、易于调制。这就促使人们重新考虑利用光来进行通信。尤其在1962年，海尔 (Hall) 等人研制出了半导体激光器。这种器件体积小、效率高、调制方便，十分适用于光通信。从1961—1970年，光通信的研究逐渐普遍，但大多是利用大气作为传输媒介。

经过十年的实践，发现气候对大气传输光通信的影响严重，并且由于气温变化引起大气密度湍动和折射率变化，使传输光束抖动，通信质量恶化。在大雾和雨雪气候，通信甚至中断。在稍长距离内，难以实现“全天候”通信。再则，大气传输必须具备的地形条件是“视线所及”，这就使它的应用受到很大的限制。

1966年，高锟 (C. K. Kao) 首先提出玻璃纤维光波导对光能的损失可低达20dB/km，因此可以把它作为光通信的传输媒介^[1]。这在当时是不可想像的，因为那时最优良的光学玻璃的损失约为700dB/km。然而在1970年，美国康宁 (Corning) 玻璃公司的莫勒 (Maurer) 等人，宣布他们研制出了

20dB/km 的光纤。不久又把损失降低到 4dB/km。于是利用光纤进行通信的可能性逐渐被公认，以致到现在被认为是发展的必然趋势。这是通信技术的一次“重大变革”。

现在光纤光缆、半导体激光器、发光管以及光检测器（如雪崩管、PIN 光电二极管等器件）已趋于成熟，现均有商品出售。实验光纤通信系统如雨后春笋，不胜枚举。速率高达每秒几千兆比特，无中继传输距离有长达几十公里。现已出现容量和传输距离同时超过电缆传输系统的光纤通信系统。从 1977 年开始，至今商用的实用化光纤通信系统已不可胜数。

光纤通信除了具有大容量、传输距离远的主要优点外，还有抗干扰、抗核辐射、抗化学侵蚀、重量轻、节省有色金属等优点，所以在电力、工业和军事部门较早采用。通常用于工业监测、控制和计算机联线。

光纤通信是一门正在发展的新技术，一方面正在从实验室走向生产，另一方面还不断出现新工艺、新方法、新水平、新成就，甚至新理论、新的技术领域，如光纤传输理论、光接收理论、光外差接收、集成光学等。光纤通信系统自然是一门重要的学科。

1.2 光纤光缆

光纤是一根很细的玻璃丝。图 1.1 是它的结构和导光机理

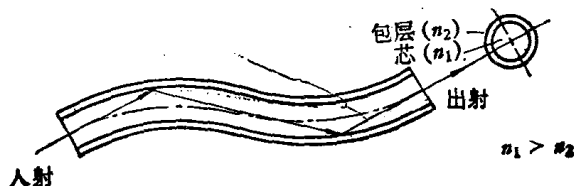


图 1.1 光纤结构和导光机理

理示意图。其中光纤芯玻璃的折射率 n_1 大于包层玻璃的折射率 n_2 。光纤是利用全反射原理进行导光的，它可以导引光线沿光纤弯曲地传输。

1. 光纤的种类

按光纤的材料分类：

- (1) 石英光纤；
- (2) 多组分玻璃光纤；
- (3) 塑料包层、石英芯光纤；
- (4) 全塑光纤。

其中以石英光纤的损失最小，最适合于长距离、大容量的光纤通信。塑料光纤适用于短距离通信。

按光纤的结构分类：

(1) 阶跃光纤：芯、包层的折射率分布为阶跃型。带宽较窄，适用于小容量、短距离通信。

(2) 渐变光纤：芯、包层的折射率分布近似为抛物线型。带宽较宽，适用于中容量、中距离通信。

按传输的模式分类：

(1) 多模光纤：传输光波的模式很多。阶跃和渐变光

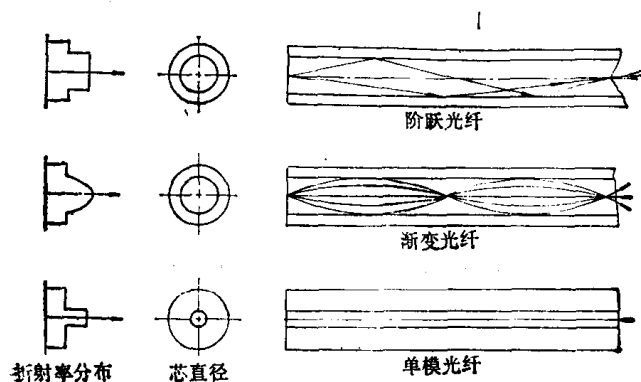


图1.2 光纤的结构及光的传播

纤均属此类。

(2) 单模光纤：传输光波的模式仅一个。芯直径约几微米。带宽极宽，适用于大容量、长距离通信。也可以认为单模光纤是一种特殊的阶跃光纤。

光纤的结构如图 1.2 所示。

2. 光纤的制造工艺

光纤的类型不同，制造工艺也不同。这里以改良的化学气相沉积法 (MCVD 法) 来说明光纤的制造工艺。对其它工艺不作介绍。

光纤的制造工艺一般可分为三个主要过程：(1) 熔炼；(2) 拉丝；(3) 套塑。

(1) 熔炼：熔炼过程是把超纯的化学原料，经高温化学反应，合成低损失的石英棒料。MCVD法的熔炼工艺示意图如图 1.3 所示。

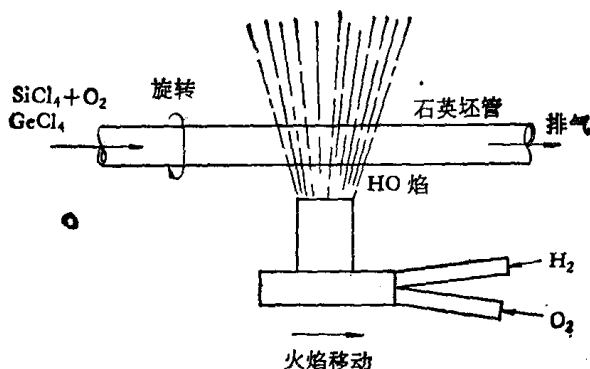
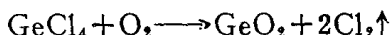
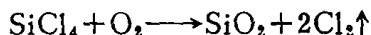


图 1.3 MCVD法熔炼工艺示意图

为了保持化学反应不受污染，所以反应是在一根石英坯管内进行。在管的一端把气相的原料四氯化硅、四氯化锗和

纯氧通入，从管的另一端将废气排出。在管外用氢氧焰加热至1400—1500℃，就将产生如下的化学反应：



SiO_2 就是石英， GeO_2 是用以改变石英折射率的掺杂物。合成的 SiO_2 和 GeO_2 以粉末形式沉积在石英管壁上，遇到了管壁上的高温就融合成一层很薄的透明的含 Ge 石英玻璃。

火焰来回移动，管子均匀旋转，优质的石英玻璃一层一层均匀地沉积在管壁内。为了制造渐变光纤，可以控制 GeCl_4 的流量以控制芯玻璃的折射率。

当管内沉积的玻璃有足够厚度时，把火焰温度加高，石英管即被软化，由于表面张力，石英管自动收缩而将管的中心孔填没，即熔炼成拉制光纤用的实心的坯棒。

(2) 拉丝：拉丝过程是把较粗的光纤坯棒拉成细长的光纤，其装置如示意图 1.4 所示。

把坯棒十分缓慢地送入高温炉，炉内温度约2000℃，光纤坯棒被软化，即拉成细的光纤。为

了保护光纤的表面不被外界污染而产生微裂纹，必须在光纤形成时立刻涂敷一层保护玻璃表面的涂料。光纤又经过固化炉，使涂料固化。最后绕卷于拉丝轮的套筒上。为了得到几

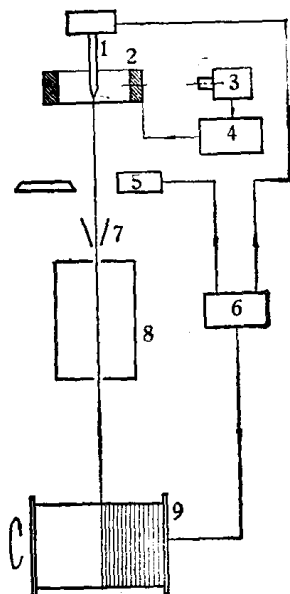


图 1.4 拉丝装置示意图

1. 光纤坯棒；2. 高温炉；3. 测温仪；4. 炉温控制；5. 非接触式测径仪；6. 调速设备；7. 光纤涂敷器；8. 固化炉；9. 拉丝轮

何尺寸的精度非常高的光纤，拉丝设备装有丝径测控反馈装置和炉温、拉丝速度的自动控制系统。

(3) 套塑：为了进一步保护光纤，提高光纤的机械强度，还需把带有涂敷层的光纤套上塑料。通常套塑有松套和紧套两种型式，如图 1.5 所示。

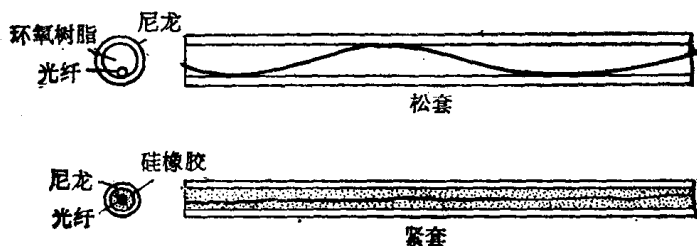


图1.5 松套和紧套光纤的结构和微弯曲

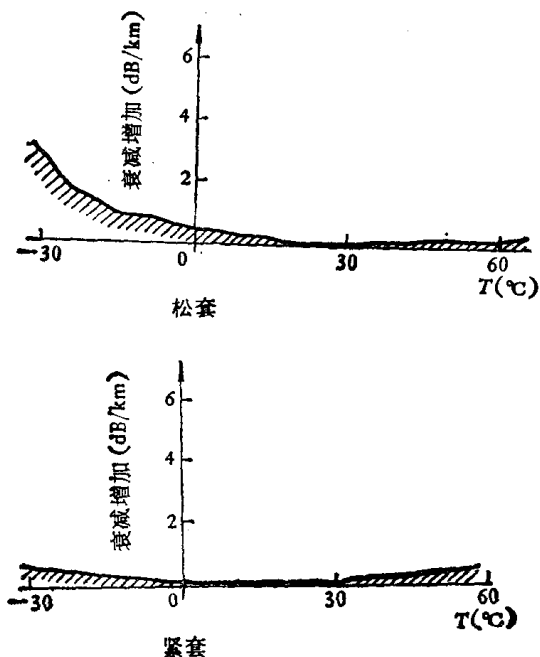


图1.6 光纤的衰减变化特性

未套塑的光纤的衰减-温度特性本来是十分优良的,它的衰减基本上不随温度变化。但在光纤套塑之后,由于套塑原料的膨胀系数较石英大得多,所以在低温时塑料收缩,形成光纤微弯曲而增加了衰减。适当注意套塑工艺就可获得温度特性良好的光纤。典型的松套和紧套光纤的衰减变化特性如图 1.6 所示。

光纤的衰减-温度特性具有随机性,图中的阴影表示随机性的范围,这些随机性主要是光纤在套管内的几何位置和摩擦的随机性所引起的。

松套和紧套光纤各有优缺点:松套光纤工艺简单、机械强度大。紧套光纤工艺难、机械强度逊于松套,但温度特性优良。

3. 光缆的结构

把光纤制成光缆,供工程应用。

光缆的结构繁多,较普通的有古典式和骨架式两种,如图 1.7 所示。

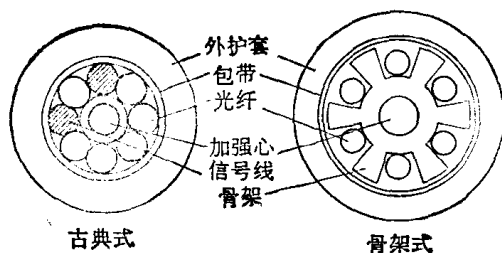


图1.7 光缆结构

光缆中间有一钢质的加强心,以便在施工中抵抗较大的张力。由于加强心的膨胀系数小于塑料,所以它能抵制塑料的伸缩从而使光缆的温度特性有所改善。

1.3 光纤通信系统

1. 光强度调制系统

光纤通信系统的示意图如图 1.8 所示。图内仅表示了单方向的信道。电端机是常规的电子通信设备。光发射机实质上是一个电光调制器，它把电端机（发）的电信号推动光源（一般是半导体激光器或发光管）发出光信号，并把该光信号耦合入光纤而送至远方。远端的光接收机装有光检测器（一般是半导体光电雪崩管或 PIN 管）把光信号转化为电信号，经放大和整形处理后还给电端机（收）。

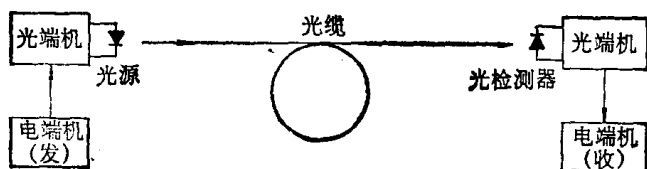


图1.8 光纤通信系统

光纤通信系统一般有模拟式和数字式两种。

模拟光纤通信系统传输的是模拟量光信息，即把光强按信息进行模拟调制。目前由于光源特别是激光器的非线性比较严重，所以模拟光纤通信系统大多用于非线性要求低的地方，要实现大容量的频分复用目前还比较困难。采用调频或调相处理电信号进行光强调制，系统的非线性将会得到一定改善。目前正在研究利用光反馈来改善光源的非线性问题。

数字光纤通信系统传输的是数字光信息。它和电缆的数字信道本质上是一样的，只是用光脉冲代替了电脉冲。由于光的能量只能是正值，不可能有负值，而电缆的 PCM 信号

常采用正负双极性脉冲。由于这个缘故，所以光纤数字系统对传输信号的处理上也稍有不同。

光纤通信系统常常采用光电雪崩二极管作光检测器。由于它具有倍增作用，可以获得较大的信号增益，但随之也带来了“倍增噪声”。倍增噪声是一种散弹噪声，它不但随倍增因子大小而变化，并且也随信号的大小而变化。这种特点使光纤通信系统的信噪比分析和误码率计算不同于常规的电子系统。此外，光信号在光纤中传播时，在一定条件下会发生所谓“模式噪声”。这也是光纤通信系统特有的问题，但目前对它的机理尚无统一成熟的认识，这里不予讨论。

光源的非线性对数字信息无多大影响，所以现在的多路通信的光纤通信系统大多采用数字制式。典型的数字式光端机的方框图如图 1.9 所示。

数字光端机各部分功能如下：

(1) 双单变换和单双变换：双单变换是把来自电气数字通信设备的双极性数字信号变换为单极性的数字信号，以便实现光调制。单双变换则是相反的过程。

(2) 扰码和反扰码：扰码是用以减少数字信号中过多过长的连“0”和连“1”码，以便于时钟的提取。反扰码则是它的还原过程。在有些具有线路码变换的光端机可以不采用扰码和反扰码，因为这些线路码变换本身已具备优良的时钟提取特性。

(3) 线路码变换和反变换：为了在不中断业务情况下监测设备的误码率，并且为了适应光纤通信系统的传输特点，需要把原来的码型变换为线路码型。反变换则是相反的过程。

(4) 光发送：光发送部分实质上是一个光调制器。它把数字信号的电脉冲调制成光信号脉冲，并把此脉冲耦合入

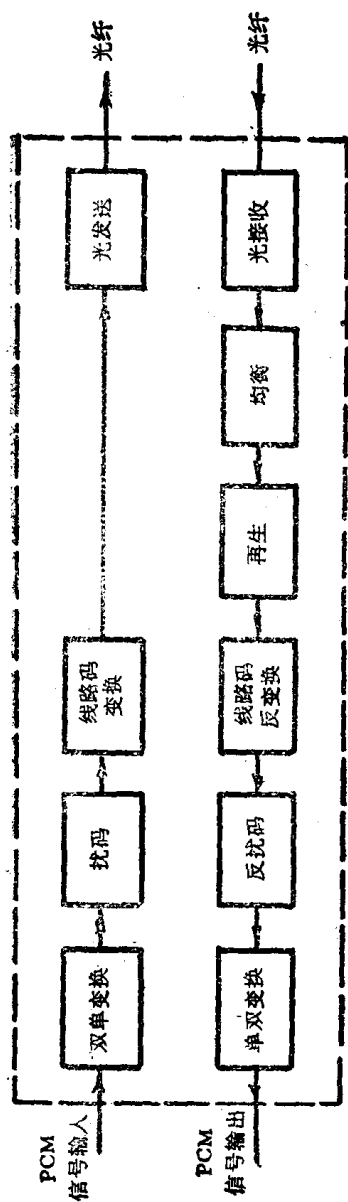


图1.9 数字式光端机方框图