

邮电高等函授教材

光纤通信原理

高炜烈 张金菊 朱大成 编

YOU DIAN GAO DENG

YOU DIAN GAO DENG

HAN SHOU

YOU DIAN GAO DENG HAN SHOU

JIAO CAI

GAO HAN

邮电高等函授教材

光纤通信原理

高炜烈 张金菊 朱大成 编

人民邮电出版社

登记证号(京)143号

内 容 提 要

本书是根据邮电函授教学指导委员会审议通过的教学大纲编写的。书中较全面地介绍了光纤通信系统中各部分的工作原理，包括：光纤、光缆、光路无源器件，光源、光发射机、光电检测器、光接收机、光纤通信系统和光纤通信系统的测量等内容。本书在编写上，力图做到条理清晰，对较复杂的数学推导注意讲清推导思路，力求便于自学。

本书是高等函授教材，也可作工程技术人员的参考书。

邮电高等函授教材

光纤通信原理

高伟烈 张金菊 宋人成 编

*

人民邮电出版社出版发行

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

新华书店总店科技发行所经销

*

开本：850×1168 1/32 1994年10月 第一版

印张：12.625 1994年10月河北第1次印刷

字数：328千字 印数：1—4000册

ISBN7-115-05240-3/TN·711

定 价：10.70 元

前 言

光纤通信技术的发展速度出乎人们的料想，从20世纪70年代后期世界上建立第一条实验电路起，至今才短短十几年时间，光缆线路已遍及祖国大地。许多原来在电通信岗位上工作的函授学员及工程技术人员迫切要求通过自学，迅速掌握这门新兴的通信技术。

然而，光纤通信技术涉及的理论较深，面也广，较难掌握。针对这种情况，我们在多年教学的基础上，编写了这本教材。在编写中注意到既要使读者对光纤通信有全面的了解；又要掌握一定的理论深度。另一方面，又不被过深的理论所影响，尽力作到能够便于自学。

这本书是在原讲义的基础上结合多年教学经验编写出来的。经邮电函授教学指导委员会电磁场及传输学科组讨论并经教学指导委员会审议推荐出版。

在编写过程中得到北京邮电学院李玲教授、蒋佩璇教授的热心指导。还得到邮电部广州通信设备厂，上海爱梯恩梯通信设备有限公司的帮助。为此，对他们表示衷心的感谢。并对原学科组的长春、南京、西安和北京邮电学院的各位老师表示感谢。

本教材第一、二、三、四、五章由张金菊同志编写，第六章由朱大成老师编写，第七、八、九、十章由高炜烈同志编写并统编全书。

由于编者水平有限、时间仓促，错误、不妥之处难免，请读者批评指正。

编 者

1993.12

目 录

第一章 概述	(1)
第一节 光的性质.....	(1)
第二节 光纤通信的特点.....	(3)
第三节 光纤通信的基本组成.....	(4)
第四节 光纤通信的发展动向.....	(6)
第二章 基础知识概括	(7)
第一节 麦克斯韦方程.....	(7)
第二节 波动方程.....	(9)
第三节 亥姆霍兹方程.....	(10)
第四节 均匀平面波的一般概念.....	(11)
第五节 平面波在两介质交界面的反射和折射.....	(14)
第六节 平面波的全反射.....	(18)
第七节 导行波和辐射波.....	(18)
小结.....	(26)
复习思考题.....	(28)
第三章 介质薄膜波导	(30)
第一节 薄膜波导的结构.....	(30)
第二节 薄膜波导中波的分类.....	(31)
一、导波.....	(32)
二、衬底辐射模.....	(32)
三、敷层辐射模.....	(32)
第三节 用射线法分析薄膜波导中的导波.....	(34)
一、薄膜波导中导波的形式.....	(34)
二、薄膜波导中导波的特点.....	(35)
三、薄膜波导中的单模传输条件.....	(41)
四、薄膜波导中模数量的求法.....	(41)

小结	(43)
复习思考题	(44)
习题	(44)
第四章 光导纤维	(46)
第一节 光纤的结构和分类	(46)
一、光纤的结构	(46)
二、光纤的种类	(46)
第二节 阶跃型光纤	(49)
一、阶跃型光纤光射线的理论分析	(49)
二、阶跃光纤的标量近似分析法	(53)
第三节 渐变型光纤	(71)
一、渐变型光纤光射线的理论分析	(71)
二、渐变型光纤的标量近似解法	(79)
第四节 单模光纤	(88)
一、单模光纤的折射率分布	(88)
二、单模传输的理论分析	(91)
三、单模光纤的双折射	(91)
第五节 光纤的传输特性	(97)
一、光纤的损耗特性	(97)
二、光纤的色散特性	(101)
小结	(115)
复习思考题	(116)
习题	(117)
附录一 标量解场方程的推导	(117)
附录二 双曲正割型折射指数分布光纤可以获得自聚焦的 证明	(124)
附录三 标量亥姆霍兹方程解的推导	(125)
第五章 光缆和光路无源器件	(129)
第一节 光缆的结构和种类	(129)

一、光缆的基本结构	(129)
二、光缆的种类	(132)
第二节 光纤连接器	(134)
第三节 光定向耦合器	(135)
第四节 光衰减器	(137)
第五节 光隔离器	(139)
小结	(140)
复习思考题	(141)
第六章 光源和光发射机	(142)
第一节 激光的物理基础	(142)
一、光的本性	(142)
二、原子的能级	(144)
三、光和物质的相互作用	(147)
第二节 激光器的工作原理	(149)
一、粒子数反转分布及光的放大作用	(149)
二、光学谐振腔	(153)
三、激光器的损耗和阈值条件	(160)
第三节 半导体激光器和半导体发光二极管	(162)
一、本征半导体的能带分布	(162)
二、N型半导体和P型半导体重掺杂的能带图	(164)
三、重掺杂情况下P-N结的能带分布	(165)
四、P-N结外加正偏压后的能带分布及激光的产生	(168)
五、异质结半导体激光器	(169)
六、半导体激光器的工作特性	(174)
七、目前光纤通信在不同工作波段所使用激光器的情况	(177)
八、半导体发光二极管(LED)	(178)
第四节 光源的调制	(179)

一、光源的内调制	(180)
二、光源的外调制	(186)
第五节 光发射机	(203)
一、对光发射机的要求	(203)
二、光发射机的组成方框图及各部分功能	(204)
三、实际光发射机电路图	(211)
小结	(212)
复习思考题	(213)
习题	(214)
第七章 光电检测器	(216)
第一节 半导体的光电效应	(216)
第二节 PIN光电二极管	(218)
第三节 APD光电二极管	(219)
一、雪崩光电二极管的雪崩倍增效应	(220)
二、雪崩光电二极管的结构及其工作原理	(220)
第四节 光电检测器的特性	(222)
一、响应度 R_0 和量子效率 η	(222)
二、响应时间	(223)
三、暗电流 I_D	(223)
四、雪崩倍增因子 G	(223)
五、倍增噪声和过剩噪声系数 $F(G)$	(224)
小结	(225)
复习思考题	(226)
习题	(227)
第八章 光接收机	(228)
第一节 数字光纤通信接收机的基本组成	(228)
一、数字光纤通信接收机的组成方框图	(228)
二、方框图中各部分的功能	(228)
三、一个实际的光接收机电路	(238)

第二节 光接收机的噪声分析和计算	(240)
一、概述	(240)
二、分析噪声所需要的有关数学知识	(241)
三、光接收机放大器、均衡器电路噪声分析和计算	(242)
四、量子噪声的分析和计算	(253)
五、在最坏的码元组合情况下光接收机的总输出噪声平均功率	(266)
第三节 光接收机灵敏度的计算	(268)
一、光接收机灵敏度的定义	(268)
二、计算光接收机灵敏度所需的有关概念	(268)
三、光接收机灵敏度表达式的推导	(274)
四、Personick-CCITT改良法	(283)
附录 8-I	(284)
小结	(290)
复习思考题	(293)
习题	(294)
第九章 光纤通信系统	(295)
第一节 强度调制——直接检测光纤通信系统的组成	(295)
一、系统的组成	(295)
二、光中继器	(297)
三、监视控制系统	(298)
四、脉冲插入与脉冲分离	(304)
第二节 光纤通信中的线路码型	(304)
一、研究传输码型的必要性	(304)
二、选择码型应满足的主要要求	(306)
三、光纤通信中常用码型	(307)
第三节 光纤通信系统的性能指标—误码率和抖	

动	(315)
一、误码性能	(315)
二、抖动性能	(317)
第四节 光纤通信系统设计概述	(320)
一、系统部件的选择	(320)
二、设计光纤通信系统时有关指标的计算和验算	(322)
第五节 光纤模拟通信系统	(330)
一、光纤图像模拟传输系统	(331)
二、光纤脉冲模拟传输系统	(333)
第六节 光纤通信中的复用系统	(335)
一、波分复用系统	(335)
二、光频分复用系统	(338)
三、副载波强度调制系统	(340)
第七节 光纤通信多终端网络系统	(341)
一、光纤局部区域网(LAN)	(341)
二、宽带综合业务数字网(B-ISDN)	(344)
第八节 外差光纤通信系统	(345)
一、光发射机	(346)
二、光放大器	(348)
三、光接收机	(348)
四、外差光纤通信系统中的几个技术问题	(349)
第九节 光纤通信同步数字系列	(350)
一、准同步数字系列存在的问题	(350)
二、同步数字系列的提出	(351)
三、同步数字系列(SDH)的特点	(352)
四、同步数字系列的帧结构	(353)
第十节 光放大器	(354)
一、光放大器在光纤通信中的地位	(354)

二、光放大器的种类	(355)
三、掺饵光纤放大器的结构	(356)
四、掺饵光纤放大器的工作原理	(356)
五、掺饵光纤放大器的指标	(358)
六、掺饵光纤放大器在光纤通信系统中的应用	(360)
第十一节 光纤的非线性效应及光孤子通信	(361)
一、光纤的非线性效应	(361)
二、光孤子通信	(364)
小结	(369)
复习思考题	(370)
习题	(370)
第十章 光纤及光纤通信系统的测量	(371)
第一节 光纤参数的测量	(371)
一、单模光纤模场直径的测量	(371)
二、光纤损耗的测量	(372)
三、光纤色散与带宽的测量	(378)
第二节 光纤通信系统的测量	(383)
一、光发射机发送光功率的测量	(383)
二、光源消光比的测量	(384)
三、光接收机灵敏度的测量	(384)
四、光接收机动态范围的测量	(385)
五、光纤通信系统测量中的眼图	(386)
小结	(387)
复习思考题	(387)
习题	(388)
参考书目	(388)

第一章 概 述

内 容 提 要

光波是一种电磁波。利用光波作为载频的通信方式称为光通信。如果传光的媒介是采用光导纤维（简称为光纤），则这种通信方式就是光纤通信。由于光纤的传光性能极其优良，因此，光纤通信方式现时已成为光通信的主流。

光纤通信技术是近年来迅猛发展的新兴技术，是世界新技术革命的重要标志，又是未来信息社会中各种信息网的主要传输工具。

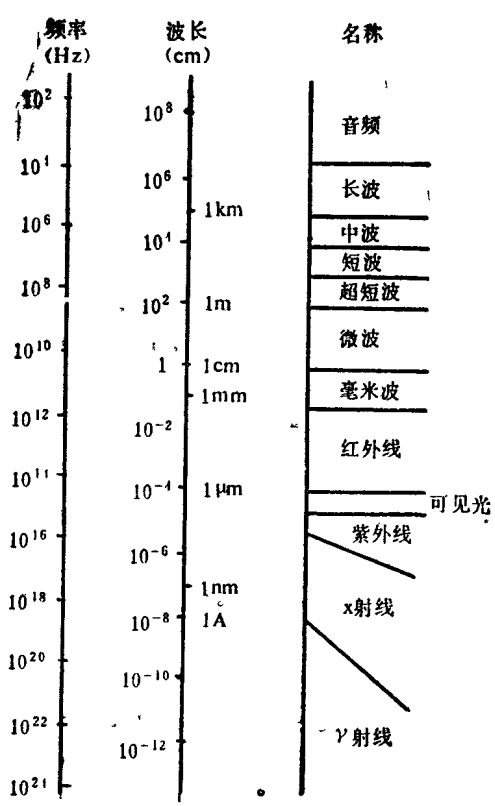
为了使读者在深入学习之前对光纤通信有一基本了解，在本章中对光的性质、光纤通信的特点和组成，以及光纤通信的发展动向作一概括介绍。

第一节 光的性质

光纤通信是用光来传递信息的。提到光这个词，人们会立即联想到阳光和电灯光。光也是一种电磁波，按照波长不同或频率不同，电磁波可分为如图1-1-1所列的种类。

射入人们眼睛的太阳光或电灯光，可以看作是波长在可见光范围内的电磁波混杂而成的。而光纤通信的波长范围是在近红外区内，即波长是 $0.8\sim 1.8\mu\text{m}$ ，对应的频率为 $167\sim 375\text{THz}$ 。

在1867年，麦克斯韦就证实了光是一种电磁波。电磁波是电波和磁波的结合。当磁场发生变化时，由于电磁感应，会产生与磁通量变化成比例的电场，反过来，电场变化也会产生相应的变化磁场。光的传播就是通过电场、磁场的状态随时间变化的规律表现出



注: $1\text{\AA} = 10^{-8}\text{cm} = 10^{-10}\text{m}$

图 1 1-1 电磁波的种类和名称

来的。

通常，根据传播方向上有没有电场分量或磁场分量，可将光（电磁波）的传播形态分成如下三类：

TEM波：在传播方向上没有电场和磁场分量，称为横电磁波；

TE波：在传播方向上有磁场分量但无电场分量，称为横电波；

TM波。在传播方向上有电场分量而无磁场分量，称为横磁波。

任何光都可以这三种波的合成形式表示出来。

第二节 光纤通信的特点

一、光纤通信与电通信的比较

光纤通信与电通信方式的主要差异有两点：一是用光作为传输信号，二是用光缆作为传输线路。因此，在光纤通信中起主导作用的是激光器和光纤。

半导体激光器的发光面积很小，它输出稳定而且方向性极好的激光，激光可以运载巨大的信息量。

光纤是一种介质光波导，具有把光封闭在其中进行传播的导波结构。它是由直径大约只有0.1mm的细玻璃丝构成。由于损耗低，所以传输距离远。

二、光纤通信的主要优缺点

1. 优点

- ①直径细、重量轻；
- ②不受电磁干扰；
- ③损耗低；
- ④传输频带宽；
- ⑤资源丰富；
- ⑥抗化学腐蚀。

2. 缺点

- ①弯曲半径不能过小；
- ②要求比较好的切断、连接技术；
- ③分路、耦合比较麻烦。

第三节 光纤通信的基本组成

光通信和传统的电气通信一样，可以分为无线光通信和有线光通信两种方式。无线光通信是大气传输，就是把发送的光信号直接经过大气空间传送到接收端，由于光波在大气层中传播受气候影响严重，通信极不稳定，所以传播的距离很短。有线光通信是19世纪70年代问世的光纤通信。发、收采用半导体光源器件和光检测器件，传输介质是光纤。

一、强度调制-直接检波通信系统的组成

目前实用的光纤通信系统普遍采用的是数字编码，并在光波上进行直接调制与解调的系统，简称为强度调制直接检波通信系统。这种系统的示意方框图如图1-3-1所示。

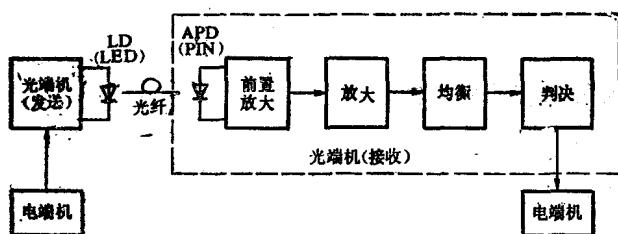


图 1-3-1 光纤数字通信系统

图中电端机就是一般的PCM端机。发送光端机是将电信号变换成光信号的光发射机，采用的光源是半导体激光器（LD）或半导体发光二极管（LED），它们的共同点都是加正向偏置电流可发光的半导体二极管，所不同的是，LD管发出的是激光，而LED管发出的是荧光。

接收光端机是将光信号变换成电信号的光接收机。光信号经过光纤传输到达接收端，首先经PIN光电二极管或者APD雪崩光电

二极管检波变为电脉冲，然后经放大、均衡、判决，恢复为电信号输出，这个电信号和发送电端机送入的电信号相同。

强度调制直接检波系统的优点是构成简单，这是目前光纤通信所普遍采用的形式。

二、调制方式

目前在光纤通信中采用直接对光源进行调制的方法，这种直接调制方法常用的有模拟信号的直接调制和数字信号的直接调制。

所谓模拟调制是直接连续变化的模拟信号对光源进行调制，使得光源的输出光功率跟随模拟信号而变化；而数字调制是指在光纤通信系统中，所传送的信息是一系列用“0”、“1”表示的数字信号时，用数字脉冲信号对光源进行强度调制，使光源的输出光功率也以矩形脉冲的有、无来表示信号。

三、损耗和传输带宽

在光纤通信中，决定中继距离的主要因素是光纤的损耗和传输带宽。

通常，用光在光纤中传输时每单位长度上的衰减量来表示光纤的损耗，单位是dB/km。目前实用的石英系光纤，在 $0.8\sim 0.9\mu\text{m}$ 波段内，损耗约为2dB/km左右，在 $1.31\mu\text{m}$ 损耗为0.5dB/km，而在 $1.55\mu\text{m}$ 处，损耗可降至0.2dB/km，这已接近 SiO_2 光纤损耗的理论极限值。因此，将 $0.85\mu\text{m}$ 称为光纤通信的短波波长，将 $1.31\mu\text{m}$ 和 $1.55\mu\text{m}$ 称为光纤通信的长波波长，这是目前光纤通信三个实用的低损耗工作窗口。

在数字光纤通信中，是以每一时隙中有无光信号来传递信息的。因此，中继距离还要受到光纤传输带宽的限制。通常用 $\text{MHz}\cdot\text{km}$ 作为单位长度光纤传输带宽的单位。如果给出某根光纤的带宽是 $100\text{MHz}\cdot\text{km}$ ，即说明每公里长光纤上，只允许传送 100MHz 带宽的信号。距离越长、传输带宽越小，则通信容量就越小。

第四节 光纤通信的发展动向

光纤通信以它独特的优点被认为是通信史上一次革命性的变革，光纤通信网将在长途通信网与市话通信网中代替电缆通信网，这已为世界各国所公认。

今后光纤通信的发展趋势，将沿着扩大通信容量、延长中继距离的主方向发展。扩大通信容量将采用光复用技术，如光波分复用系统、副载波复用系统可大幅度提高通信容量；延长中继距离可采用超长波长通信系统、全光通信系统以致更新的光孤子通信系统。

由于目前实用光纤在 $1.55\mu\text{m}$ 波长，其损耗值已接近 SiO_2 光纤的理论极限值，要想进一步降低损耗，必须从光纤的材料上想办法，因此氟化物光纤的研制得到普遍重视，在光波长超过 $2\mu\text{m}$ 时，其损耗值可降到 0.001dB/km ，中继距离可延至上千公里。

光纤放大器是实现全光传输的关键，目前世界上许多国家对掺铒光纤放大器进行了实验，美国AT&T、Bell实验室利用掺铒光纤放大器成功地实现了 5Gbit/s 和 2.4Gbit/s 的传输实验，传输距离分别为 9000km 和 21000km ，因此，在不久的将来，即可达到实用化。

随着人类生产的发展，需要传输和交换的信息量越来越大，要求交换的信息种类越来越多，为了统一管理，将各种通信业务都变为数字信号，综合到一个网中，这即是综合业务数字通信网（ISDN），而同步光纤通信网为实现宽带综合业务数字通信网（B-ISDN）提供了技术上的可能性。