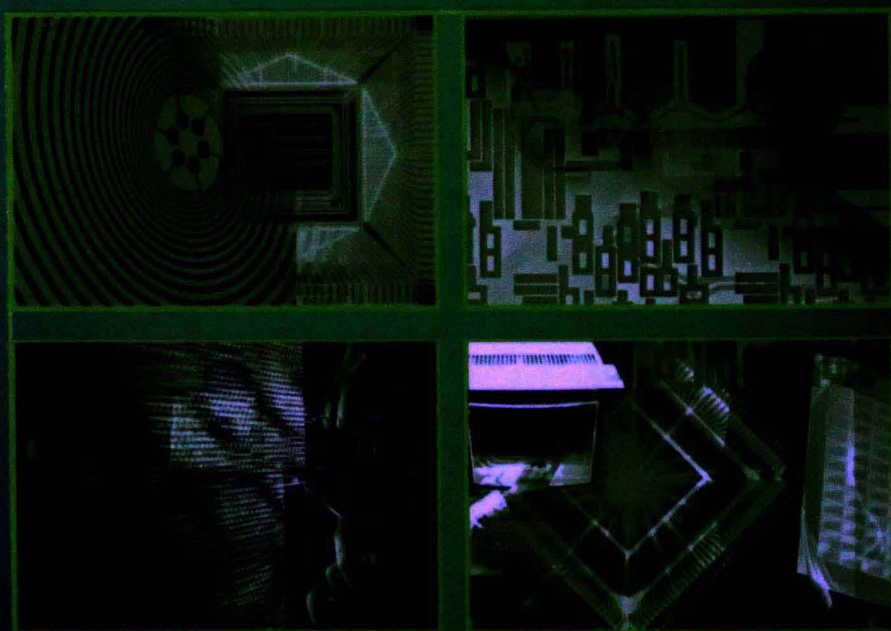


❖ 普通高等教育电子信息类规划教材 ❖

光纤通信 简明教程

CONCISE COURSE
OF FIBER OPTIC COMMUNICATION



原荣 编著



 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

普通高等教育电子信息类规划教材

光纤通信简明教程

原 荣 编著

机械工业出版社

本书根据光纤通信技术和工程应用的最新进展,为满足一般院校教材的需求,就光纤通信系统的基本知识,以通俗易懂、简单明了的方式编写。

全书共分9章,首先讲解了光纤通信历史、系统构成和网络分类;接着介绍了光纤光缆、光无源/有源器件、光发射/接收;然后阐述了SDH、ATM、IP/GMPLS、HFC、WDM和光的相干检测传输系统,甚至还给出光正交频分复用(O-OFDM)和射频信号光纤传输(RoF)系统的一般概念;随后介绍了无源光网络接入技术、光纤通信测量仪器和指标测试方法;最后讲解了光传输网络管理(含ASON)和生存性措施。

本书选取了光纤通信技术的最新素材,收录了大量有用的光纤通信工程数据和图表,反映了当前光纤通信技术的发展水平。

本书可作为通信和电子信息类相关专业一般院校的教材。教师可根据教学对象和教学时间进行适当的选取和安排。对从事光纤通信系统和网络研究教学、规划设计、管理和维护的有关人员也有一定的参考价值。

为了教师和工程技术人员电子教学和培训的需要,本书免费提供电子课件和习题题解参考答案。欢迎使用该教材的教师登录 www.cmpedu.com 免费注册、审核后下载,或联系编辑索取(QQ: 1157122010, 电话 88379753)。

图书在版编目(CIP)数据

光纤通信简明教程/原荣编著. —北京:机械工业出版社, 2013. 7

普通高等教育电子信息类规划教材

ISBN 978-7-111-43406-1

I. ① 光… II. ① 原… III. ① 光纤通信-高等学校-教材
IV. ① TN929.11

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第165466号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:李馨馨

责任编辑:李馨馨

责任印制:张楠

涿州市京南印刷厂印刷

2013年8月第1版第1次印刷

184mm×260mm·13印张·320千字

0001-3000册

标准书号:ISBN 978-7-111-43406-1

定价:29.90元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

社服务中心:(010)88361066

销售一部:(010)68326294

销售二部:(010)88379649

读者购书热线:(010)88379203

网络服务

教材网:<http://www.cmpedu.com>

机工官网:<http://www.cmpbook.com>

机工官博:<http://weibo.com/cmp1952>

封面无防伪标均为盗版

前 言

1966 年, 英籍华人高锟发表了关于通信传输新介质的论文, 指出利用玻璃纤维进行信息传输的可能性和技术途径, 从而奠定了光纤通信的基础。在此后短短的 40 多年中, 光纤损耗由当时的 3 000 dB/km 已经降低到目前的 0.151 dB/km。在光纤损耗降低的同时, 光纤通信用光源、探测器和无源/有源器件, 无论是分立元件, 还是集成器件都取得了突破性的进展。自 20 世纪 70 年代中期以来, 光纤通信的发展速度之快令人震惊, 可以说没有任何一种通信方式可以与之相比拟, 光纤通信已成为所有通信系统的最佳技术选择。

目前, 无论电信骨干网还是用户接入网, 无论陆地通信网还是海底光缆网, 无论看电视还是打电话, 光纤无处不在、无时不用, 光纤传输技术随时随地都能碰到。所以, 对于从事信息技术的人员来讲, 了解光纤通信的基本知识是至关重要的。

本书内容全, 技术新, 实用性强, 概念解释清楚, 叙述浅显易懂, 前后呼应, 系统连贯。比如在第 1 章, 在介绍平面电磁波时, 提到“光波在给定时间被一定的距离分开的两点间存在的相位差”这一概念很重要, 提醒大家要注意, 因为以后经常会用到。果然, 在以后介绍马赫 - 曾德尔 (MZ) 干涉仪构成的滤波器、复用/解复用器和调制器, 以及由 AWG 构成的诸多器件时均用到这一光程差的概念, 并经常使用同一个公式。比如从一根筷子插入水中似乎变得向上弯曲和水下潜水员为什么有时看不到岸上的姑娘开始, 引出光纤传输光的原理; 又比如从声波的干涉和夹紧弦线的固有振动开始, 介绍光滤波器的工作原理; 再比如从光栅衍射开始, 介绍 DFB 激光器的工作原理, 使读者很容易理解这些内容的机理。

本书选取了光纤通信技术的最新素材, 收录了大量有用的光纤通信工程数据和图表, 反映了当前光纤通信技术的发展水平。

本书最后给出详尽的名词术语索引, 在教学和实际工作中, 可以根据需要从关键字 (已给出所在章节的位置) 查找到系统设计和工程计算所需要的内容、数据、图表和公式。

为了教师和工程技术人员电子教学和培训的需要, 本书将免费提供各章的电子教学课件, 包括书中所有的插图和对插图的简要说明, 并提供各章习题题解。对填写了“情况调查表”的注册教师用户, 可登录 www.cmpedu.com 网, 免费注册后下载使用, 欢迎任课教师及时反馈建议。

本书可作为通信和电子信息类相关专业一般院校的教材。教师可根据教学对象和教学时间进行适当的选取和安排。对从事光纤通信系统和网络研究教学、规划设计、管理和维护的有关人员也有一定的参考价值。

因作者水平所限, 书中可能会有遗漏之处, 敬请读者指出, 联系方式: giocyr@163.com。

原 荣

目 录

前言

第1章 光纤通信概述	1
1.1 光通信发展史	1
1.1.1 周幽王烽火戏诸侯——古老的光通信	1
1.1.2 中华民族对世界光学事业的贡献	1
1.1.3 谁发明了光电话	1
1.1.4 谁发明了激光器	2
1.1.5 最早的光通信系统	2
1.1.6 光纤是怎样传光的	3
1.1.7 光纤通信的鼻祖——高锟	4
1.2 光纤通信的优点	5
1.3 光纤通信系统	6
1.3.1 光纤通信系统组成	6
1.3.2 三种基本的光纤通信系统	7
1.4 光纤通信网络分类	7
1.5 均匀介质中的光波——光是电磁波	8
1.6 复习思考题	10
1.7 习题	10
第2章 光纤通信传输介质	11
2.1 光纤结构和类型	11
2.2 光纤传光原理	12
2.2.1 光的反射和折射	12
2.2.2 渐变多模光纤的传光原理	14
2.3 光纤传输特性	15
2.3.1 衰减	15
2.3.2 色散	16
2.3.3 光纤带宽	18
2.3.4 光纤比特率	19
2.4 光纤的种类	20
2.4.1 多模光纤和单模光纤	20
2.4.2 单模光纤的种类	20
2.5 光纤制造工艺	22
2.6 复习思考题	23

2.7 习题	23
第3章 光纤通信器件	25
3.1 光纤通信无源器件	25
3.1.1 光连接器	25
3.1.2 光耦合器	26
3.1.3 光滤波器	27
3.1.4 波分复用/解复用器	31
3.1.5 光开关	36
3.1.6 光调制器	38
3.2 光纤通信有源器件——光放大器	40
3.2.1 光放大器概述	40
3.2.2 掺铒光纤放大器 (EDFA) 的构成	41
3.2.3 EDFA 的工作原理及其特性	42
3.2.4 光纤拉曼放大器	44
3.2.5 半导体光放大器 (SOA)	45
3.2.6 光放大器应用	46
3.3 复习思考题	48
3.4 习题	48
第4章 光发射和接收	49
4.1 激光器和光发射机	49
4.1.1 发光机理	50
4.1.2 LD 激光发射的条件	50
4.1.3 半导体激光器	52
4.1.4 波长可调半导体激光器	53
4.1.5 高速光发射机	55
4.2 光探测器和光接收机	55
4.2.1 光探测原理	56
4.2.2 PIN 光探测器	57
4.2.3 雪崩光敏二极管 (APD)	57
4.2.4 波导光探测器 (WG-PD)	58
4.2.5 光接收机的工作原理和性能	61
4.2.6 相干光接收机	64
4.3 复习思考题	65
4.4 习题	65
第5章 光纤通信系统	67
5.1 光纤通信系统基础	67
5.1.1 脉冲编码——将模拟信号变为数字信号	67
5.1.2 信道编码——减少误码方便时钟提取	70
5.1.3 信道复用——提高信道容量, 充分利用光纤带宽	72

5.1.4 光调制——让光携带声音和数字信号	73
5.2 SDH 光纤传输系统	76
5.2.1 时分复用的工作原理	76
5.2.2 SDH 的基本概念	78
5.2.3 SDH 帧结构和传输速率	79
5.2.4 SDH 复用映射结构	79
5.2.5 SDH 设备类型和系统组成	80
5.2.6 SDH 物理层	83
5.2.7 SDH 网同步	84
5.3 异步传输模式 (ATM) 技术	84
5.3.1 从同步模式 (STM) 到异步模式 (ATM)	84
5.3.2 ATM 的基本概念	85
5.3.3 ATM 的信元结构	86
5.3.4 ATM 复用和交换原理	86
5.3.5 ADSL 接入系统	90
5.3.6 ATM 的现状和未来	92
5.4 IP 互联网	93
5.4.1 IP 简述	93
5.4.2 以太网	94
5.4.3 IP 骨干网技术及其演进	96
5.4.4 多协议标记交换 (MPLS)	97
5.4.5 通用多协议标记交换 (GMPLS)	98
5.5 光纤/电缆混合 (HFC) 网	99
5.5.1 频分复用 (FDM) 的工作原理	100
5.5.2 HFC 网的网络结构	100
5.5.3 HFC 网的构成	101
5.6 波分复用 (WDM) 系统	103
5.6.1 波分复用的概念	103
5.6.2 WDM 的系统构成	104
5.7 光正交频分复用 (O-OFDM) 光纤传输系统	108
5.7.1 O-OFDM 的基本原理	108
5.7.2 射频信号光纤传输 (RoF) 系统	109
5.8 光纤技术在移动通信中的应用	110
5.9 复习思考题	112
5.10 习题	112
第6章 无源光网络接入技术	114
6.1 接入网在网络建设中的作用及发展趋势	114
6.1.1 接入网在网络建设中的作用	114
6.1.2 光接入网技术演进	114

6.1.3 三网融合——接入网的发展趋势	116
6.2 网络结构	117
6.2.1 网络结构概述	117
6.2.2 光线路终端 (OLT)	119
6.2.3 光网络单元 (ONU)	120
6.2.4 光分配网络 (ODN)	122
6.3 无源光网络 (PON) 基础	124
6.3.1 分光比	124
6.3.2 结构和要求	124
6.3.3 下行复用技术	125
6.3.4 上行接入技术	125
6.3.5 安全性和私密性	127
6.4 PON 接入系统	128
6.4.1 EPON 系统	128
6.4.2 GPON 系统	129
6.4.3 WDM-PON 系统	133
6.4.4 正交频分复用 PON (OFDM-PON)	135
6.5 复习思考题	135
6.6 习题	136
第7章 光纤通信仪器及指标测试	137
7.1 光纤通信测量仪器	137
7.1.1 光功率计	137
7.1.2 光纤熔接机	138
7.1.3 光时域反射仪	139
7.1.4 误码测试仪	140
7.1.5 PCM 综合测试仪	140
7.1.6 SDH 测试仪	141
7.1.7 光谱分析仪	141
7.1.8 多波长光源	142
7.1.9 光衰减器	143
7.1.10 综合测试仪	143
7.2 光纤传输特性测量	144
7.2.1 损耗测量	144
7.2.2 带宽测量	145
7.2.3 色散测量	145
7.3 光器件参数测量	146
7.3.1 光源参数测量	146
7.3.2 探测器参数测量	147
7.3.3 无源光器件参数测量	150

7.4 光纤通信系统指标测试	152
7.4.1 平均发射光功率和消光比测试	152
7.4.2 光接收机灵敏度和动态范围测试	153
7.4.3 光纤通信系统误码性能测试	155
7.5 复习思考题	156
第8章 光传输网络管理	157
8.1 网络管理概述	157
8.1.1 网络管理协议和体系结构	157
8.1.2 对网络管理体系的要求	157
8.1.3 光网络的分级管理	158
8.2 光学层管理	159
8.2.1 对光学层的要求	159
8.2.2 设备的互操作性	159
8.2.3 光监控信道	159
8.2.4 光学安全管理	160
8.3 性能和故障管理	161
8.3.1 误码率测量	161
8.3.2 报警管理	162
8.3.3 控制	162
8.4 配置管理	162
8.4.1 设备管理	162
8.4.2 波长管理	163
8.4.3 连接管理	163
8.4.4 带宽和协议管理	164
8.4.5 适应性管理	164
8.5 自动交换光网络 (ASON)	165
8.5.1 ASON 概述	165
8.5.2 ASON 的体系结构	166
8.5.3 ASON 提供的 3 种连接	167
8.5.4 ASON 网络结构模型	168
8.5.5 ASON 网络管理	169
8.6 复习思考题	170
第9章 光纤通信网络的生存性	171
9.1 网络生存性基本概念	171
9.1.1 生存性定义和措施	171
9.1.2 工作路径和保护路径	172
9.1.3 单向保护切换和双向保护切换	172
9.2 SDH 网络的保护	173
9.2.1 路径保护	173

9.2.2 环路保护	174
9.2.3 路由保护	176
9.2.4 保护切换准则	176
9.3 IP 网络的生存性	177
9.3.1 IP/MPLS 备用通道恢复	177
9.3.2 IP/MPLS 的 LSP 通道保护	177
9.4 光学层保护	178
9.4.1 光学层保护技术	178
9.4.2 1+1 光信道专用保护	180
9.4.3 格状网的保护	180
9.4.4 WDM 网络保护、生存和互联	181
9.5 ASON 网络的生存性	182
9.5.1 ASON 网络生存性新特点	182
9.5.2 基于控制平面的保护	182
9.5.3 基于传输平面的保护	182
9.5.4 ASON 网络的恢复	183
9.6 复习思考题	184
附录	185
附录 A 电磁波频率与波长的换算	185
附录 B dBm 与 mW、 μ W 的换算	185
附录 C dB 值和功率比	186
附录 D 百分损耗 (%) 与分贝 (dB) 损耗换算表	186
附录 E PDH 与 SDH 速率等级	187
附录 F WDM 信道 $\Delta\lambda$ 和 $\Delta\nu$ 的关系	188
附录 G 物理常数	188
附录 H 名词术语索引	188
参考文献	198

第1章 光纤通信概述

1.1 光通信发展史

1.1.1 周幽王烽火戏诸侯——古老的光通信

什么叫光通信？光通信是利用光波作为载体来传递信息的通信。

广义地说，用光传递信息并不是什么新鲜事。早在公元前两千多年以前，我们的祖先就在都城和边境堆起一些高高的土丘，遇到敌人入侵，就在这些土丘上燃起烟火传递受到入侵的信息，各地诸侯看见烟火就立刻领兵来救援，这种土丘叫做烽火台，它就是一种古老的光通信设备。其中“周幽王烽火戏诸侯”的故事流传甚广（见图 1.1.1），昏君周幽王为了让自己的爱妃开怀一笑，在无敌情的情况下，点燃烽火令各路诸侯派兵救援。然而当真正有敌人入侵时，再一次点燃烽火，却没人理会。

另外，夜间的信号灯、水面上的航标灯也是古老光通信的实例。



图 1.1.1 古老的光通信设备——烽火台（周幽王烽火戏诸侯）

1.1.2 中华民族对世界光学事业的贡献

谈到中华民族对世界光学事业的贡献，我们还可以追溯到公元前三世纪，在我国周代就会用凹透镜向日取火，可以说是奥林匹克向日取火的鼻祖，而西方国家直到公元十三世纪才相传有人用了三年时间，用金属磨成一个凹面镜，在太阳光下取火，这比我国至少落后十几个世纪。还有公元前 400 年，我国先秦时代伟大的学者墨翟在他的《墨经》里就对光的几何性质在理论上作了比较完整的论述，它比欧几里得著的《光学》也早 100 多年。

1.1.3 谁发明了光电话

1876 年，美国人贝尔（Bell）发明了光电话，他用太阳光作光源，通过透镜把光束聚焦

在送话器前的振动镜片上。如图 1.1.2 所示，人的嘴对准橡胶管前面的送话口，一发出声音，振动镜就振动而发生变形，引起光的反射系数发生变化，使光强度随话音的强弱变化，实现话音对光强度的调制。这种已调制的反射光通过透镜 2 变成平行光束向右边传送。在接收端，用抛物面镜把从大气传送来的光束反射到处于焦点的硒管上，硒的电阻随光的强弱变化，使光信号变换为电流，传送到受话器，使受话器再生出声音。在这种光波系统中，光源是太阳光，接收器是硒管，传输介质是大气。1880 年使用这种光电话传输距离最远仅 213 m，很显然这种系统没有实用价值。

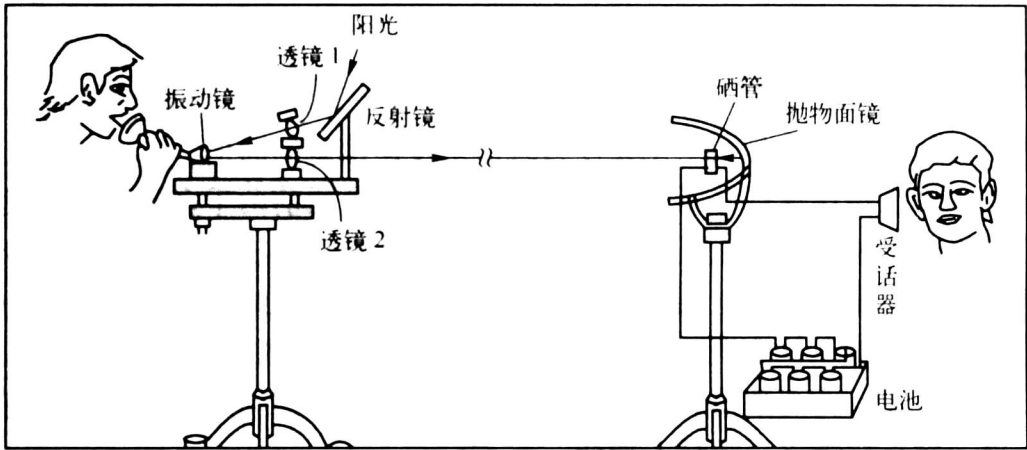


图 1.1.2 1876 年贝尔（Bell）光电话实验装置

1.1.4 谁发明了激光器

用灯泡作光源时，调制速度非常有限，只能载运一路音频信号。

1960 年，美国人梅曼（Maiman）发明了第一台红宝石激光器，之后氦 - 氖（He - Ne）气体激光器、二氧化碳（CO₂）激光器也先后出现，并投入实际应用，给光通信带来了新的希望。激光（LASER）是取英文 Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation 的第一个字母组成的缩写词，其意思是受激发射的光放大。这种光与燃烧木材和钨丝灯发出的光不一样，它是由物质原子结构的本质决定的光，它的频率很高，超过微波频率一万倍，也就是说它的通信容量要比微波大一万倍，如果每个话路频带宽度为 4 kHz，则可容纳 100 亿个话路。而且，激光的频率成分单纯，方向性好，光束发散角小，几乎是一束平行的光束，所以对光通信来说很有吸引力。

1.1.5 最早的光通信系统

自贝尔发明光电话后，有人又用弧光灯代替日光作为光源延长了通信距离，但还是只限于几千米。在第一次世界大战期间，曾使用弧光灯作发射机，通过声生电流对其光强进行调制；使用硅光电池作接收器，当调制后的光信号照射到硅光电池的 PN 结上时，通过光伏效应就在外电路产生变化的光电流，在晴好天气通信距离可达 8 km，如图 1.1.3a 所示。当光电管出现后，人们又用它作为接收器，将调制后的光信号还原成电信号，如图 1.1.3b 所示。光电倍增管中有电压逐级提高的多级阳极，其工作原理就是利用电子多级加速发射使外电路的光生电流放大而工作的。

实验表明，用光波承载信息的大气传输进行点对点通信是可行的，但是通话的性能受空

气的质量和气候的影响十分严重，不能实现全天候通信。

为了克服气候对激光通信的影响，人们把激光束限制在特定的空间内传输，因而在 1960 年提出了透镜波导和反射镜波导的光波传输系统，如图 1.1.3b、c 所示。这两种波导从理论上说是可行的，但是实现起来却非常困难，地上人为的活动会使地下的透镜波导变形和振动，为此必须把波导深埋或选择在人车稀少的地区使用。

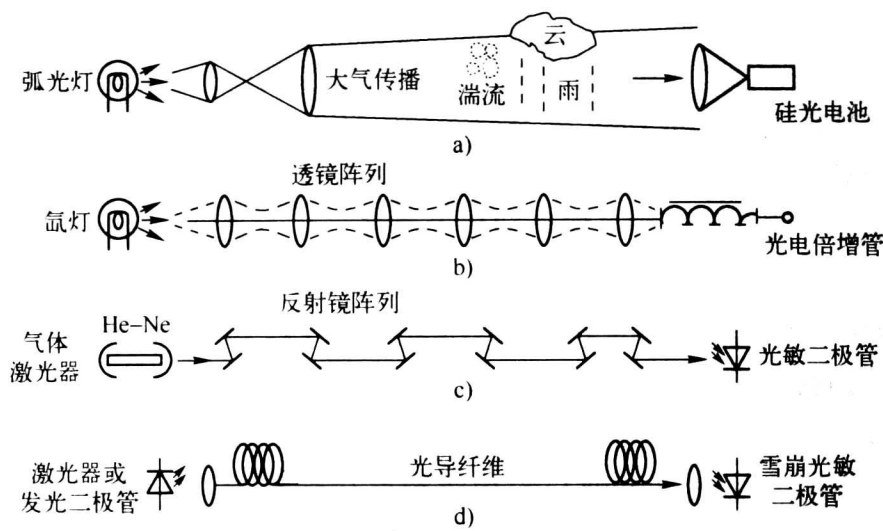


图 1.1.3 光通信发展历史

a) 大气传输光通信 b) 透镜波导 c) 反射镜波导 d) 现代光纤通信

1.1.6 光纤是怎样传光的

大气传输容易受到天气的影响，透镜波导传输又容易受外界影响产生变形和振动，由于没有找到稳定可靠和低损耗的传输介质，所以光通信的研究曾一度陷入低潮。

那么能不能找到一种介质，就像电线电缆导电那样来传光呢？

古代希腊的一位吹玻璃工匠观察到，光可以从玻璃棒的一端传输到另一端。1930 年，有人拉出了石英细丝，人们就把它称为光导纤维（简称光纤）或光纤波导，并论述了它传光的原理。接着，这种玻璃丝在一些光学机械设备和医疗设备（如胃镜）中得到应用。

现在，为了保护光纤，在它外面包上一层塑料外衣，使它可以在一定程度上弯曲，而不会轻易折断。那么，光能不能沿着弯曲的光纤波导传输呢？答案是肯定的。

光纤由纤芯和包皮两层组成，它们都是玻璃，只是材料成分稍有不同。一种光纤的芯径只有 50 ~ 100 μm ，包皮直径约为 120 ~ 140 μm ，所以光纤很细，比头发丝还细。假定光线对着纤维以一定入射角射入光纤，如图 1.1.4 所示，当光线传输到芯和皮的交界面上时，会发生类似镜子反射光的现象，当碰到对面的交界面时，又一次反射回来。当光线传输到光纤的拐弯处时，来回反射的次数就会增多，只要弯曲不是太厉害，光线就不会跑出光纤。光线就是这样在光纤内往返曲折地向前传输。

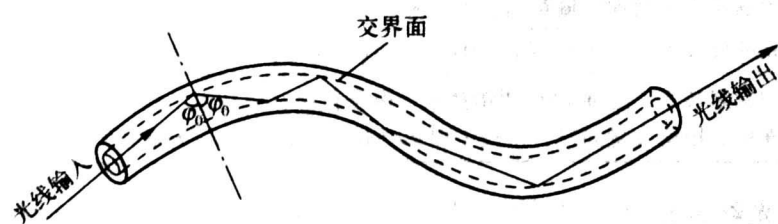


图 1.1.4 光线在光纤里传输的示意图

1.1.7 光纤通信的鼻祖——高锟

看来，用光纤来导光进行光通信的问题似乎已解决了。其实问题并没有那么简单，因为用普通玻璃制成的光纤损耗很大，每千米就有3 000分贝，记做3 000 dB/km。这样的光纤，当光通过100 m后，它的能量就只剩下了百亿分之一了。所以，要想用光纤进行通信，关键问题在于如何降低光纤的损耗。

但是，到了20世纪60年代中期，情况发生了根本性的变化，而且这种变化还是由一位华人引起的，他就是高锟。早在1966年7月，英籍华人高锟发表了具有历史意义的关于通信传输新介质的论文。当时他还是一位在英国Harlow ITT实验室工作的年轻工程师，他指出了利用光导纤维进行信息传输的可能性和技术途径，从而奠定了光纤通信的基础。在高锟早期的实验中，光纤的损耗约为3 000 dB/km，他指出这么大的损耗不是石英纤维本身的固有特性，而是由于材料中的杂质离子的吸收引起的，如果把材料中金属离子含量的比重降低到 10^{-6} 以下，光纤损耗就可以减小到10 dB/km，再通过改进制造工艺，提高材料的均匀性，可进一步把光纤的损耗减小到几dB/km。这种想法很快就变成了现实，1970年，光纤进展取得了重大突破，美国康宁（Corning）公司研制成功损耗为20 dB/km的石英光纤。目前G. 654光纤在1.55 μm波长附近仅为0.151 dB/km，接近了石英光纤的理论损耗极限。图1.1.3d就是目前正在应用的利用光导纤维进行光通信的示意图。

在光纤损耗降低的同时，作为光纤通信用的光源，半导体激光器也出现了，并取得了实质性的进展。1970年，美国贝尔实验室和日本NEC公司先后研制成功室温下连续振荡的GaAlAs双异质结半导体激光器，1977年半导体激光器的寿命已达到10万h，完全满足实用化的要求。

低损耗光纤和连续振荡半导体激光器的研制成功，是光纤通信发展的重要里程碑。20世纪90年代，掺铒光纤放大器（EDFA）的应用迅速得到了普及，用它可替代光－电－光再生中继器，同时可对多个1.55 μm波段的光信号进行放大，从而使波分复用（WDM）系统得到普及。光通信发展的简史如表1.1.1所示。

表 1.1.1 光通信发展简史

古代光通信	烽火台，夜间的信号灯，水面上的航标灯
1880 年	美国人贝尔发明了光电话（光源为阳光，接收器为硒管，传输介质为大气）
20 世纪 60 年代	1960 年，美国发明了第一台红宝石激光器，并进行了透镜阵列传输光的实验 1961 年，制成氦－氖（He－Ne）气体激光器 1962 年，制成砷化镓半导体激光器 1966 年，英籍华人高锟就光缆传输的前景发表了具有历史意义的论文，此时光纤损耗约为3 000 dB/km
20 世纪 70 年代	1970 年，美国康宁公司研制成功损耗为20 dB/km的石英光纤 1970 年，美国贝尔实验室和日本NEC公司先后研制成功室温下连续振荡的GaAlAs双异质结半导体激光器
20 世纪 80 年代	提高传输速率，增加传输距离，大力推广应用，光纤通信在海底通信获得应用
20 世纪 90 年代	掺铒光纤放大器（EDFA）的应用迅速得到了普及，WDM系统实用化
21 世纪	先进的调制技术、超强FEC纠错技术、电子色散补偿技术、偏振复用相干检测技术，以及有源和无源器件集成模块大量问世，出现了以40 Gb/s和100 Gb/s为基础的WDM系统的应用

由于高锟在开创光纤通信历史上的卓越贡献，1998年IEE授予他荣誉奖章，如图1.1.5所示。在2009年10月6日瑞典皇家科学院又授予高锟2009年度诺贝尔物理学奖。



图 1.1.5 光纤通信发明家高锟
a) 1998 年高锟（左）在英国接受 IEE 授予的奖章 b) 诺贝尔物理学奖获得者高锟

进入 21 世纪，由于多种先进的调制技术、超强 FEC 纠错技术、电子色散补偿技术、偏振复用相干检测技术、扩展到长波段（L 波段）的共掺磷和铒放大器（P-EDFA）技术、低损耗和大有效面积光纤等一系列新技术的突破和成熟，以及有源和无源器件集成模块的大量问世，出现了以 40 Gbit/s 和 100 Gbit/s 为基础的 WDM 系统的应用。下一代高速相干光通信系统的目标是每信道传输容量至少超过 100 Gbit/s。

1.2 光纤通信的优点

在光纤通信系统中，作为载波的光波频率比电波频率高得多，而作为传输介质的光纤又比同轴电缆损耗低得多，因此相对于电缆或微波通信，光纤通信具有许多独特的优点。

1. 频带宽、传输容量大

电缆和光纤的损耗和频带比较如表 1.1.2 所示，由表可见，电缆基本上只适用于数据速率较低的局域网（LAN），高速局域网（≥100 Mbit/s）和城域网（MAN）必须采用光纤。

表 1.1.2 电缆和光纤的损耗和频带比较

类 型		频带（或频率）	损耗/（dB/km）	传输容量/（话路/线）	
对称电缆		4 kHz	2.06		
细同轴电缆		1 MHz	5.24	960	
		30 MHz	28.70		
粗同轴电缆		1 MHz	2.42	1 800	
		60 MHz	18.77		
渐变折射率 多模光纤	0.85 μm	200 ~ 1 000 MHz · km	≤3	1 920 (140 Mbit/s)	
	1.31 μm	≥1 000 MHz · km	≤1.0		
单模 光纤	1.31 μm	> 100 GHz	0.36	32 000	491 520
	1.55 μm	10 ~ 100 GHz	0.2	(2.5 Gbit/s)	(40 Gbit/s)

2. 损耗小、中继距离长

表 1.1.2 给出了电缆和光纤的每千米传输损耗。由表可见，电缆的损耗通常在几分贝到

十几分贝，而 $1.55\ \mu\text{m}$ 光纤的损耗通常只有 $0.2\ \text{dB}$ ，显然，电缆的损耗明显大于光纤，有的甚至大几个数量级。

3. 重量轻、体积小

由于电缆体积和重量较大，安装时还必须慎重处理接地和屏蔽问题，在空间狭小的场合，如舰船和飞机中，这个弱点更显突出。

4. 抗电磁干扰性能好

光纤是由电绝缘的石英材料制成的，光纤通信线路不受各种电磁场的干扰和闪电雷击的损坏，所以无金属加强筋光缆非常适合于存在强电磁场干扰的高压电力线路周围以及油田、煤矿和化工等易燃易爆环境中使用。

5. 泄漏小、保密性好

在现代社会中，不但国家的政治、军事和经济情报需要保密，企业的经济和技术情报也成为竞争对手的窃取目标。因此，通信系统的保密性能是用户往往必须考虑的一个问题。现代侦听技术已能做到在离同轴电缆几千米以外的地方窃听电缆中传输的信号，可是对光缆却困难得多。因此，要求保密性高的网络不能使用电缆。

在光纤中传输的光泄漏是非常微弱的，即使在弯曲地段也无法窃听。没有专用的特殊工具，光纤是不能分接的，因此信息在光纤中传输非常安全，对军事、政治和经济具有重要的意义。

6. 节约金属材料，有利于资源合理使用

制造同轴电缆和波导管的金属材料，在地球上的储量是有限的，而制造光纤的石英 (SiO_2)，在地球上的储量是多到无法估算的。

总之，由于通信用光纤都是用石英玻璃和塑料制成的，是极好的电绝缘体，而且光信号在光缆中传输时不易产生泄漏，所以不存在电气危害、电磁干扰、接地、屏蔽和保密性差等问题，再加上传输特性好的优点，使光纤成为迄今为止最好的信息传输媒质，因此不管是在干线网上，还是在接入网上，光纤通信都取得了飞速的发展。

1.3 光纤通信系统

1.3.1 光纤通信系统组成

用光纤传输信息的过程如图 1.3.1 所示，在发送端，把用户要传送的信号（如声音）变为电信号，然后使光源发出的光强随电信号变化，这个过程称为调制，它把电信号变为光信号，最后用光纤把该光信号传送到远方；在接收端，用光探测器接收光信号，并把光信号还原为携带用户信息（如声音）的电信号，这个过程称为解调，最后再变成用户能理解的信息（如声音）。

目前，光源通常用半导体激光器及其光电集成组件。光纤短距离用多模光纤，长距离用单模光纤。光探测器用 PIN 光敏二极管或雪崩光敏二极管（APD）及其光电集成组件。调制器有使光信号强度随电信号变化的直接调制，这就像调幅收音机使电载波的幅度随声音的强弱变化一样；而另外一种调制方式却不同，它不会使光信号强度随电信号强弱直接变化，

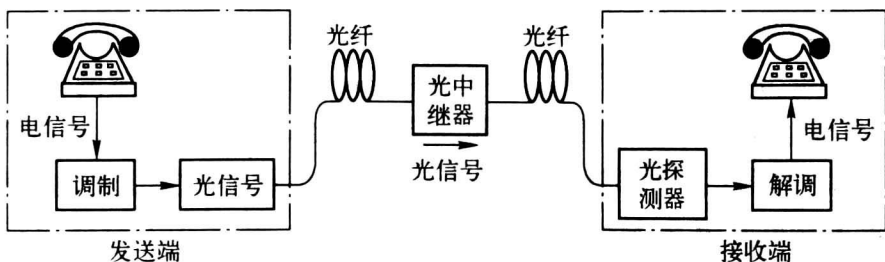


图 1.3.1 光纤通信系统的组成

而是使光源发出连续不断的光波，它的强度变化是通过一个外调制器实现的，这种调制方式叫外调制。光纤就像电线一样也有损耗，所以光信号在光纤内传输时，它的光强也逐渐减弱。为此，就像在电缆通信系统中有电中继器一样，在光纤通信系统中也有光中继器，使传输的光信号放大。光中继器有光 - 电 - 光中继器和直接对光放大的全光中继器。本书就对光纤通信系统所用到的各种器件和各个组成部分逐一加以介绍。

因为光纤通信总是和光打交道，所以本书首先把光波和光波的传输特性向读者介绍。

1.3.2 三种基本的光纤通信系统

我们可以把光纤通信系统划分为三类，如图 1.3.2 所示。这些系统用来连接一些节点，这些节点通常可能是交换机、终端、计算机、工作站和电话机等。在图 1.3.2 中，从左到右分别表示点对点系统、一点对多点系统以及网络的拓扑结构。在点对点系统中，可能是单向的，也可能是双向的，一端的发射机发送信息到另一端的接收机。在一点对多点（设有 N 个工作站）的系统中，其中站 1 可发送信息到所有其他 $N - 1$ 个站，并可能收到它们的回答，但其他站之间不能相互通信。该系统的一个特殊情况是广播网络，即一个站可发送信息到所有其他 $N - 1$ 个站。

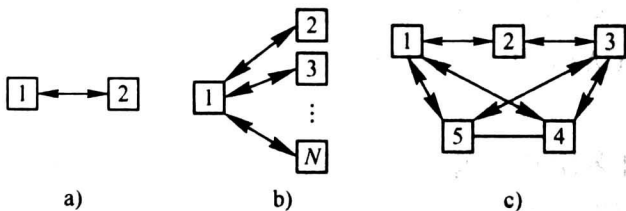


图 1.3.2 光纤通信系统结构分类

a) 点对点 b) 一点对多点 c) 网络

点对点系统和一点对多点系统仅仅是网络的特例。在网络中，每个站可以与其他任一个站进行通信，而绝不仅仅是一个站只能与另外 $N - 1$ 个站通信。有时候我们要指出它们之间的区别，有时候我们把以上三种情形统称为系统或者网络。

现在的情况是已经敷设好的长距离干线正在转变成一点对多点系统或网络。前者的应用多半是光纤到家或者是到办公室，而网络的进一步应用将变成局域网（LAN）、城域网（MAN）和广域网（WAN）。

1.4 光纤通信网络分类

光纤通信网络的分类没有统一的标准，但是通常可以从网络的主要性能、网络的技术特