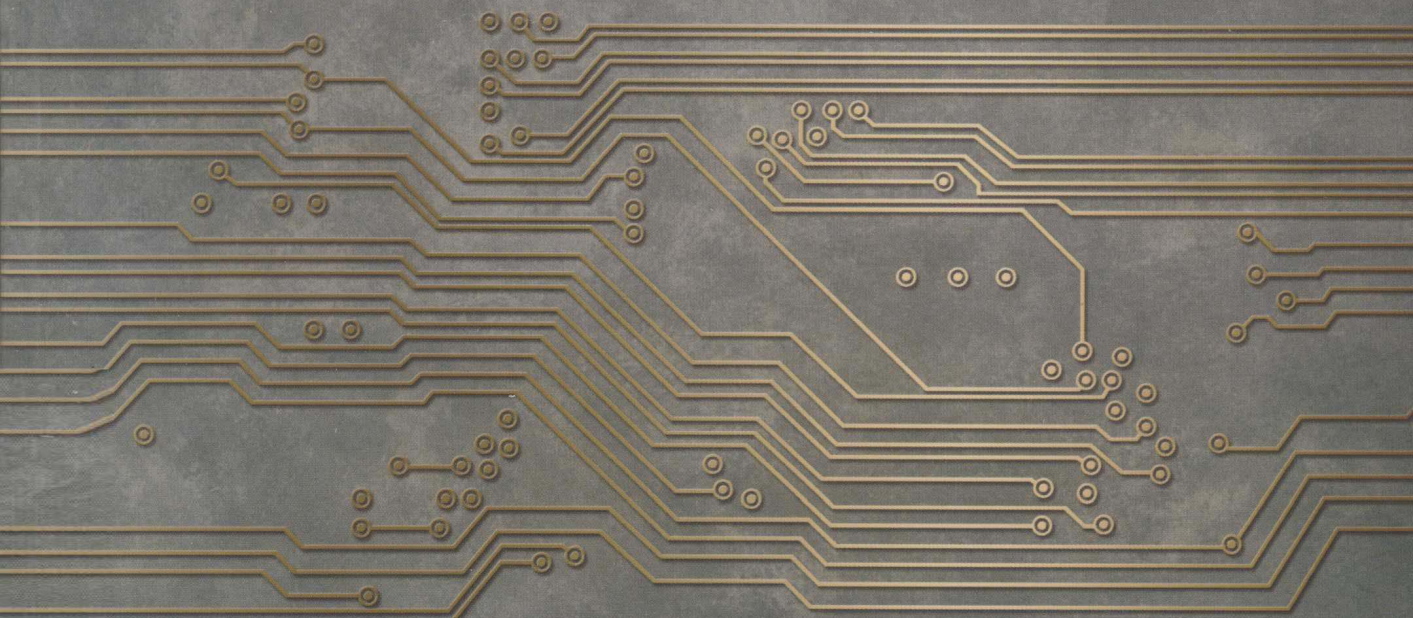


新编电气与电子信息类本科规划教材

光纤通信

(第2版)

王辉 主编 王平 于虹 副主编 张明德 主审



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>

中国科学技术出版社

光纤通信

(第2版)

主编 张明 副主编 王明 李强 张华 王华 李华 张华 王华 李华

中国科学技术出版社

新编电气与电子信息类本科规划教材

光纤通信

(第2版)

王 辉 主编 王 平 于 虹 副主编
张明德 主审

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书系统介绍了光纤通信系统的概念、光纤的传输特性、光源和光检测器的工作原理及工作特性、有源和无源光网络器件的工作原理及应用、光纤通信系统的设计、光缆线路的施工和测试、波分复用、光纤网络、光通信新技术等。本书内容全面，讲解深入浅出，实践性与理论性相结合，是高等学校电子信息类专业本科生、研究生的教材，也可供相关专业技术人员参考。

未经许可，不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。
版权所有，侵权必究。

图书在版编目（CIP）数据

光纤通信/王辉主编. —2版. —北京：电子工业出版社，2009.1
（新编电气与电子信息类本科规划教材）

ISBN 978-7-121-07595-7

I. 光… II. 王… III. 光纤通信—高等学校—教材 IV. TN929.11

中国版本图书馆CIP数据核字（2008）第166166号

责任编辑：韩同平

印 刷：北京市海淀区四季青印刷厂

装 订：涿州市桃园装订有限公司

出版发行：电子工业出版社

北京市海淀区万寿路173信箱 邮编：100036

开 本：787×1092 1/16 印张：17.5 字数：450千字

印 次：2009年1月第1次印刷

印 数：3000册 定价：29.00元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题，请向购买书店调换。若书店售缺，请与本社发行部联系，联系及邮购电话：（010）88254888。

质量投诉请发邮件至 zlts@phei.com.cn，盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线：（010）88258888。

前 言

光纤通信在社会信息化发展的进程中扮演着重要的角色，是通信技术的一个重要分支。随着新型光电器件的不断出现，光纤通信技术也得到了迅速的发展，使其传输容量得到了极大提高。目前，光纤已经在很多场合取代了铜线而成为主要的传输媒介。无论电信骨干网还是以以太网或校园网乃至智能建筑内的综合布线系统，无论陆地还是海洋，都有光纤的存在，都涉及到光纤传输技术。对于从事信息技术的人员而言，了解光纤通信的基础知识是至关重要的。

本教材在介绍光纤通信所涉及的基本理论时，力求条理清晰，简明扼要，叙述通俗易懂。在器件的内容选择上，注重了先进性和应用性相结合，突出工作特性及产品技术规范，例如对光放大器等内容的介绍。考虑到社会发展对知识和应用复合型人才的需要，在教学内容的选择上，增加了光纤通信系统的设计和光缆线路施工与测试两章。从体现光纤通信系统实用水平的角度而言，波分复用技术无疑是个代表。鉴于光纤系统的网络化，本书也专门介绍了相关的知识。

全书共分 10 章，第 1 章介绍了光纤通信的基本概念和特点、光纤通信系统的基本组成、基本技术问题和主要性能指标，并对该领域做了回顾与展望。第 2 章介绍了光在光纤中的传输机理及分布模式，分析了光纤的色散及衰减特性，讨论了色散补偿方案、光纤中的非线性效应，并介绍了光纤制作工艺、光纤产品及其使用特性。第 3 章介绍了半导体发光二极管和半导体激光二极管光源的工作原理、应用及光发射机的组成，并说明了高速系统中所使用外调制器的工作原理。第 4 章介绍了光电检测器的原理、特性及产品和技术参数，然后介绍了数字光接收机的组成及技术指标，最后介绍了光收发模块。第 5 章介绍了光纤通信网络中常用的有源器件和无源器件的基本工作原理，讨论了它们在网络中的作用及它们的应用方法，并给出了它们的技术参数。第 6 章介绍了光纤通信系统设计的原则，对数字和模拟光纤链路设计的技术指标、要求及方法做了具体讨论，最后给出了光纤传输系统实例。第 7 章介绍了光缆的结构、类型和技术规范、光缆线路施工的步骤及方式，并介绍了施工中常用的器件和测试仪器、故障诊断的方法和排除步骤。第 8 章介绍了波分复用的基本原理、基本组成，详细介绍了系统所用关键器件的工作原理与技术参数，并给出了波分复用设备实例。第 9 章介绍了光纤网络的分类、拓扑结构，构成光纤网络的基本要素，重点讨论了 SDH 网络及设备实例。第 10 章介绍了光通信有关系统和网络的最新技术。

本书参考教学时数为 54 学时（必修部分为 32 学时，选修部分为 22 学时）。

本书的第 3 章和第 4 章由王平和王辉编写，第 8 章和第 9 章由于虹编写，第 10 章由王琛和王辉编写，其余各章由王辉编写并由王辉统审全稿。

本书由东南大学张明德教授主审，张教授为本书提出了宝贵意见，在此对他表示衷心的感谢。

由于作者认识的局限，书中难免有不当之处，敬望读者批评指正。

编 者

2008 年 10 月于南京

目 录

第 1 章 绪论	1	2.3.5 单模光纤的非线性效应	54
1.1 光纤通信的概念	2	2.4 多模光纤	57
1.1.1 什么是光纤通信	2	2.4.1 多模光纤的衰减	57
1.1.2 光纤通信中光的作用及特性	2	2.4.2 多模光纤的色散	58
1.1.3 光纤通信的优势	5	2.4.3 多模光纤的带宽	59
1.2 光纤通信系统的基本单元	7	2.5 光纤使用特性和产品介绍	59
1.2.1 光发射机	7	2.5.1 光纤制作工艺	59
1.2.2 光纤	11	2.5.2 光纤的使用特性	62
1.2.3 光接收机	12	2.5.3 光纤产品介绍	64
1.2.4 光放大器	14	2.5.4 光纤的型号	65
1.3 光纤通信的基本问题	15	本章小结	66
1.3.1 衰减	15	习题	67
1.3.2 色散	17	第 3 章 光源和光发射机	69
1.3.3 非线性效应	20	3.1 激光二极管	70
1.4 光纤通信系统的主要性能指标	21	3.1.1 工作原理	70
1.4.1 比特率和带宽	21	3.1.2 LD 的性质	74
1.4.2 传输距离	22	3.1.3 LD 的类型	78
1.4.3 通信容量	23	3.1.4 LD 组件及其技术指标	80
1.5 光纤通信技术的回顾和展望	24	3.2 发光二极管	81
1.5.1 回顾	24	3.2.1 LED 结构	81
1.5.2 趋势	25	3.2.2 LED 特性	83
本章小结	26	3.2.3 LED 与光纤的耦合	84
习题	27	3.2.4 LED 的技术参数	86
第 2 章 光纤	29	3.3 光发射机	86
2.1 光纤结构	30	3.3.1 模拟光发射机	86
2.1.1 阶跃折射率光纤	30	3.3.2 数字光发射机	87
2.1.2 渐变折射率光纤	31	3.4 外调制器	89
2.2 光纤传输原理	31	3.4.1 外调制器特点和类型	89
2.2.1 几何光学分析法	31	3.4.2 外调制器工作原理	91
2.2.2 波动方程分析法	35	3.4.3 外调制器技术指标	92
2.3 单模光纤	47	本章小结	93
2.3.1 单模传输条件及模场分布	47	习题	93
2.3.2 单模光纤的衰减	49	第 4 章 光检测器和光接收机	95
2.3.3 单模光纤的色散与带宽	49	4.1 光检测器的工作原理	96
2.3.4 色散补偿方案	52	4.1.1 PIN 光检测器	96

4.1.2 APD 光检测器	97	6.4 光纤系统实例	157
4.2 光检测器的特性参数	99	6.4.1 设备互联方案	157
4.2.1 光检测器性能参数	99	6.4.2 数据/视频光端机在闭路监控 系统中的应用	157
4.2.2 光检测器的噪声	101	6.4.3 多通道业务光端机的应用	159
4.2.3 光检测器产品介绍	102	本章小结	160
4.3 光接收机	103	习题	160
4.3.1 光接收机的组成	103	第 7 章 光缆线路的施工和测试	163
4.3.2 光接收机的技术指标	105	7.1 光缆	164
4.4 光收发合一模块	109	7.1.1 光缆的结构与类型	164
本章小结	111	7.1.2 光缆的技术规范	166
习题	112	7.2 光缆施工	168
第 5 章 光网络器件	113	7.2.1 施工准备工作	168
5.1 光放大器	114	7.2.2 室外光缆敷设	169
5.1.1 概述	114	7.2.3 室内光缆敷设	173
5.1.2 半导体光放大器	117	7.2.4 光缆接续与成端	173
5.1.3 掺杂光纤放大器	119	7.3 常用仪器	175
5.1.4 拉曼光纤放大器	125	7.3.1 光时域反射仪	175
5.1.5 光放大器的应用	127	7.3.2 光谱分析仪	177
5.2 无源器件	129	7.3.3 光纤熔接机	177
5.2.1 耦合器	129	7.3.4 光源与光功率计	178
5.2.2 滤波器	133	7.4 测试和故障检修	179
5.2.3 隔离器	137	7.4.1 光特性测试	180
5.2.4 环形器	138	7.4.2 电特性测试	180
5.2.5 衰减器	139	7.4.3 故障检修	181
5.2.6 连接器	139	本章小结	182
5.2.7 光开关	141	习题	182
本章小结	143	第 8 章 波分复用技术	185
习题	143	8.1 WDM 工作原理	186
第 6 章 光纤通信系统的设计	145	8.1.1 WDM 工作原理	186
6.1 设计原则	146	8.1.2 WDM、DWDM 与 CWDM	187
6.1.1 工程设计与系统设计	146	8.2 WDM 系统的基本组成	189
6.1.2 系统设计的内容	146	8.3 WDM 系统中的关键器件	189
6.1.3 系统设计的方法	148	8.3.1 WDM 系统中的光源	189
6.2 数字传输系统的设计	150	8.3.2 WDM 系统中的接收机	194
6.2.1 技术考虑	150	8.3.3 WDM 系统中的光放大器	194
6.2.2 光通道功率代价、损耗及 色散预算	151	8.3.4 WDM 系统中的波分复用器/ 解复用器	198
6.3 模拟传输系统的设计	153	8.3.5 WDM 系统中的光纤	207
6.3.1 系统组成及其评价	153	8.4 波分复用系统规范	210
6.3.2 光放大器对系统性能的影响	156		

8.4.1 光波长的分配·····	210	10.1 相干光通信·····	250
8.4.2 光接口规范·····	210	10.1.1 相干检测原理·····	250
8.5 设备实例·····	211	10.1.2 调制与解调·····	251
本章小结·····	213	10.1.3 接收灵敏度·····	252
习题·····	213	10.1.4 相干光通信的关键技术·····	252
第9章 光纤网络 ·····	215	10.1.5 相干光通信的优点及其应用·····	253
9.1 网络历史回顾·····	216	10.2 光孤子通信·····	254
9.2 光纤网络基本知识·····	217	10.2.1 光孤子通信的基本原理·····	254
9.2.1 光纤网络的拓扑结构·····	217	10.2.2 光孤子通信系统·····	255
9.2.2 光纤网络的物理构件·····	220	10.3 光时分复用·····	257
9.2.3 网络分层体系结构——OSI 参考 模型·····	220	10.3.1 光时分复用原理·····	257
9.3 基于光纤系统的三大网络·····	221	10.3.2 光时分复用的关键技术·····	259
9.3.1 光纤计算机通信网·····	221	10.3.3 光时分复用的特点·····	259
9.3.2 光纤电话网·····	225	10.4 光码分多址·····	260
9.3.3 有线电视网·····	226	10.4.1 光码分多址的基本原理·····	260
9.4 光纤接入网·····	228	10.4.2 光码分多址的关键技术·····	261
9.4.1 光纤接入网的形式和业务类型·····	228	10.4.3 光码分多址的特点·····	262
9.4.2 无源光网络(PON)·····	229	10.5 自动交换光网络·····	262
9.5 光纤网络传输体制·····	232	10.5.1 自动交换光网络的体系结构·····	263
9.5.1 概述·····	232	10.5.2 自动交换光网络的组网方案·····	264
9.5.2 SDH/SONET 的基本概念·····	233	10.5.3 自动交换光网络的关键技术·····	265
9.5.3 SDH/SONET 结构·····	235	10.5.4 自动交换光网络的优点·····	266
9.5.4 SDH/SONET 设备·····	237	10.5.5 自动交换光网络存在问题及 发展现状·····	266
9.5.5 SDH 设备实例·····	238	10.6 自由空间光通信·····	267
9.6 多波长光纤网络·····	242	10.6.1 概述·····	267
9.6.1 WDM 光网络构成·····	242	10.6.2 系统组成及工作原理·····	267
9.6.2 WDM 光网络的分层·····	243	10.6.3 系统关键技术·····	268
9.6.3 WDM 全光网络关键器件·····	243	10.6.4 设备实例·····	269
本章小结·····	247	本章小结·····	270
习题·····	247	习题·····	270
第10章 光通信新技术 ·····	249	参考文献 ·····	271

第1章 绪论

内容提要

本章介绍光纤通信的基本概念和特点、光纤通信系统的基本组成，讨论衰减、色散等光纤通信的基本技术问题和主要性能指标，并对该领域做回顾与展望，使读者对光纤通信的基本知识有较系统的了解。

知识要点

- 光纤通信系统中光的特性
- 光纤通信系统的基本组成
- 衰减、色散、非线性效应
- 比特率和带宽、传输距离、通信容量

教学建议

学时6，必修

1.1 光纤通信的概念

1.1.1 什么是光纤通信

通信是各种形式信息的有效传递，为了实现这一目的，需要相应的技术设备和传输介质。

我们以调幅广播为例，话音信号经过话筒后转变为电信号，然后借助于频率范围为 526.5~1605.5kHz 的载波，将信号“装载”到载波上并通过发射天线发送出去，在接收端由接收天线再将其“卸载”下来，这个过程称为信号的调制和解调。调幅广播的传输介质是大气信道。

光纤通信是用光作为信息的载体，以光纤作为传输介质的一种通信方式。它首先要在发射端将需传送的电话、电报、图像和数据等信号进行光电转换，即将电信号变成光信号，再经光纤传输到接收端，接收端将接收到的光信号转变成电信号，最后还原成原信号。图 1.1.1 为光纤通信系统的构成示意图。

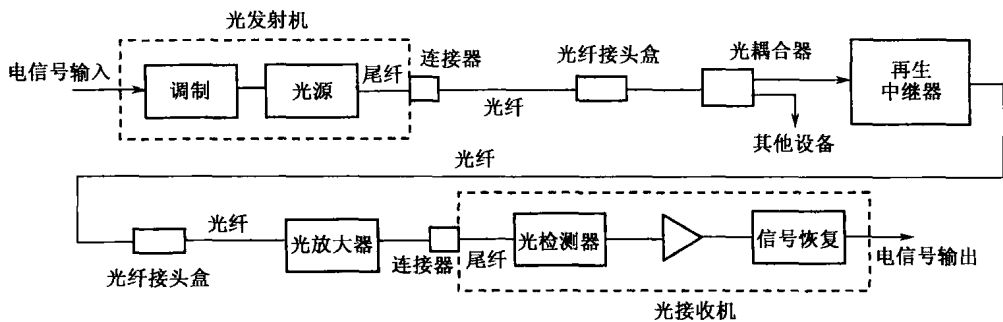


图 1.1.1 光纤通信系统的构成

光纤通信系统可分为三个基本单元：光发射机、光纤和光接收机。光发射机由将带有信息的电信号转换成光信号的转换装置和将光信号送入光纤的传输装置组成。光源是其核心部件，由半导体发光二极管 LED (Light Emission Diode) 或者激光二极管 LD (Laser Diode) 构成；光纤在实用系统中一般以光缆的形式存在；光接收机由光检测器、放大电路和信号恢复电路组成。光发射机和光接收机也称为光端机。在光纤通信系统中还包括大量的有源、无源光器件，连接器起着各种设备与光纤之间的连接作用，光耦合器用于需要将传输的光分路或合路的场合，光放大器起着对光波放大的作用，用于弥补光信号传输一定距离后，因光纤衰减产生的光功率减弱。

1.1.2 光纤通信中光的作用及特性

在光纤通信系统中，光是信息的载体，光必须经过光纤传播，而在光发射机和光接收机中，核心部件承担着电/光、光/电的转换，可见光在光纤通信中的重要地位。光的性质有很多，下面将围绕光在光纤通信中的作用进行讨论。

1. 光作为载波，可以极大地提高信道的带宽

带宽是信号进行传输且没有明显衰减的频率范围，信道的带宽越大，信道容量就越大。我

们以模拟信号为例，说明信号携带的信息量与其所占的带宽有关。比如，话音信号的带宽约为4kHz，电视图像信号的带宽为6MHz，显然电视图像的信息量比话音信号的信息量大。所以信号占据的频带宽，意味着携带的信息量大，那么传输该信号的信道带宽也要随之增大。信道容量与信道带宽之间的关系可由香农·哈特利（Shannon-Hartley）定理表示：

$$C = B \log_2(1 + \text{SNR}) \quad (1.1.1)$$

式中， C 为信道容量（单位为 b/s）； B 为信道带宽（单位为 Hz），SNR 是信号功率与噪声功率的比值，称之为信噪比。由式（1.1.1）可见，增加信道带宽可以有效地提高信道容量。

信道的带宽又取决于载波的频率，载波频率越高，信道的带宽就越大，系统的信息传输能力也就越强。按经验，带宽大约为载波信号频率的十分之一。从图 1.1.2 的通信系统电磁波频谱可见，双绞线的工作频率可以到 300kHz，同轴电缆为 1GHz，微波波导传输信号的频率可高达 100GHz，而光纤通信所用光的频率范围为 100~1000THz，其带宽可达 50THz。目前单波长信号速率已达到 40Gb/s，已经实现了单根光纤传输容量为 10.96Tb/s 的实验系统。

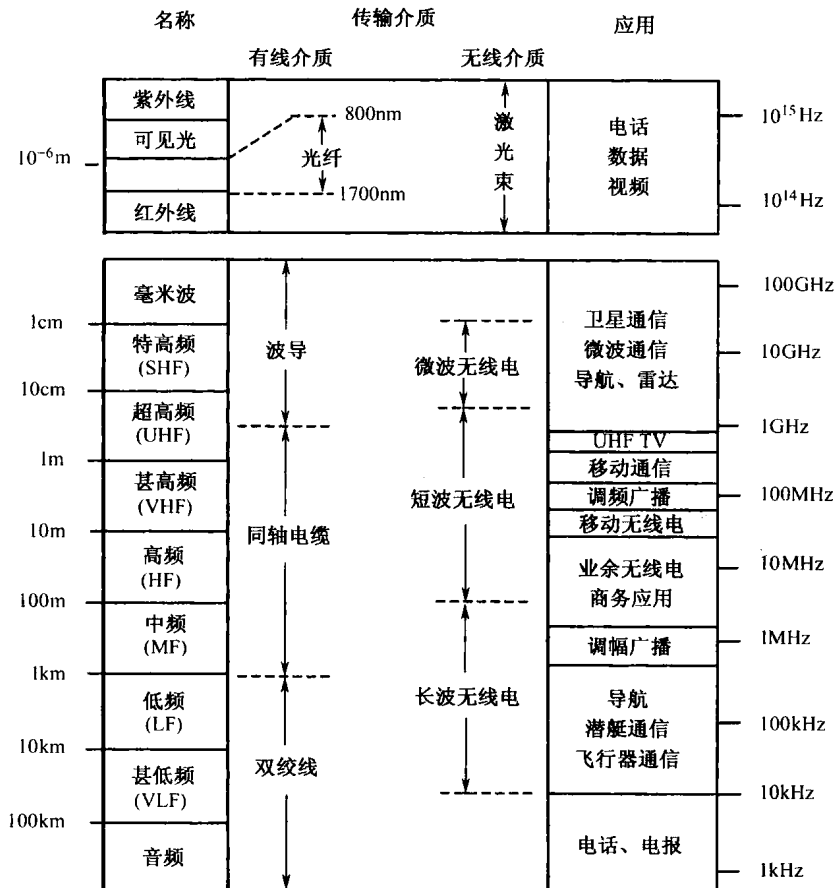


图 1.1.2 通信系统电磁波谱

2. 光在光纤中传输的工作波长由光纤特性决定

可见光的波长范围为 400~700nm，从理论上来说，光还包括紫外线和红外线，其波长范围大约为 $3 \sim 3 \times 10^6 \text{nm}$ ，光纤通信光源使用的波长范围在近红外区内，波长在 800~1700nm 之间，属于不可见光，但这个范围的光不是都可以在光纤中传输的。事实上光纤对不同波长的光

呈现的传输特性有很大差别，这里主要考虑光纤的衰减特性，也称为损耗特性，因为低损耗是实现光信号长距离无中继传输的前提。

光纤的损耗包含两个方面：一是因光纤材料（石英）和结构引起的吸收、散射等造成的损耗，二是组成系统时所产生的损耗，例如接插件连接损耗、弯曲损耗等，在此仅说明光纤本身的损耗。图 1.1.3 是一个典型的石英光纤损耗谱，由图可见，大约在 850nm、1310nm 和 1550nm 处有三个低损耗窗口，也称为透光窗口。第一代光纤通信系统工作在 850nm 附近，早期制造的光纤在这个区域有局部的最小损耗。现在通过降低光纤材料中氢氧根离子和金属离子的含量，已经可以制造在 1100~1600nm 范围内损耗极低的光纤，目前常用的工作波长在 1310nm 和 1550nm 处。三个窗口的衰减分别为：850nm 附近为 2dB/km，1310nm 附近为 0.5dB/km，1550nm 附近为 0.2dB/km。我们把 1530~1565nm 的波长范围称为 C 波段，这是目前高速大容量长距离系统常用的波段。

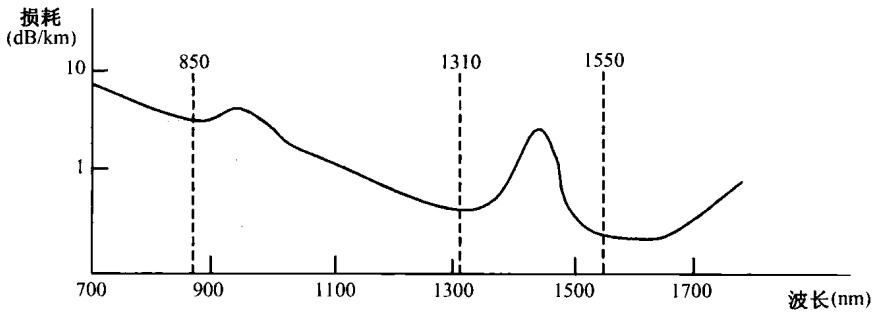


图 1.1.3 光纤损耗的波长特性

3. 光在光发射机和光接收机中的工作是基于光的辐射与吸收

光发射机和光接收机中的光源和光检测器是基于半导体材料对光的辐射与吸收机理工作的。半导体材料的导电特性介于金属和绝缘体之间，其导电特性可以借助于图 1.1.4 所示的能带图来解释，纵轴表示能量，横轴长度没有意义。

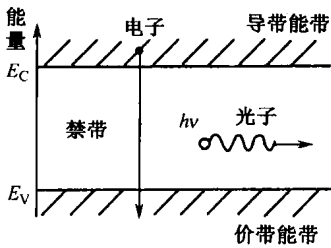


图 1.1.4 能带图

如果导带 E_C 上的电子跃迁到价带 E_V 上，其间的能量差（也称能带差） $E_g = E_C - E_V$ 将以光的形式放出，这个释放的能量被称做光子，光子的频率记作 ν ，它与能带差的关系为

$$E_g = h\nu \quad (1.1.2a)$$

或者

$$\lambda = \frac{hc}{E_g} \quad (1.1.2b)$$

式中， h 为普朗克常数 ($h = 6.626 \times 10^{-34} \text{J} \cdot \text{s}$)； c 为光速； E_g 的单位是电子伏特 (eV)， λ 的单位为微米 (μm)。我们可以通过控制半导体材料的成分来改变能带差，从而改变其发光波长。半导体发光二极管 LED 的工作正是基于电子从高能带跃迁到低能带将电能转变为光能的机理。把电流注入到半导体中的 PN 结上，则原子中占据低能带的电子被激励到高能带后，再跃迁到低能带上，它们将自发辐射出光子，如图 1.1.5 (a) 所示。

高能带中的电子实际上处于不同的能级，不可能都恰好带有相同的能量。当它们自发辐射到低能带的不同能级上时，根据式 (1.1.2a) 可知，这些光波的频率并不完全一样。另外这些

光波还具有不同的相位和偏振方向，因此自发辐射光是一种非相干光，即不是单一频率、相位和偏振方向相同的光。

光检测器的工作过程则与 LED 相反，如果把能量大于 E_g 的光照射到半导体材料上，则处于低能带的电子吸收该能量后被激励而跃迁到高能带上。我们可以通过在半导体 PN 结上外加电场，将处于高能带的电子取出，从而使光能转变为电能，如图 1.1.5 (b) 所示。

激光二极管 LD 的工作机理为受激发射，即在入射光的激发下，产生与入射光频率、相位、偏振方向及传播方向一样的发射光。当然，后者的强度远远大于前者，如图 1.1.5 (c) 所示。要实现受激发射需要两个条件：一是高能带上的电子密度要大于低能带上的电子密度，这种状态称为粒子数反转，可采用通过向半导体激光二极管注入正向电流的方式来实现粒子数反转；二是半导体激光器中必须存在光子谐振腔，并在谐振腔里建立起确定的振荡，从而得到单色性和方向性好的激光输出。

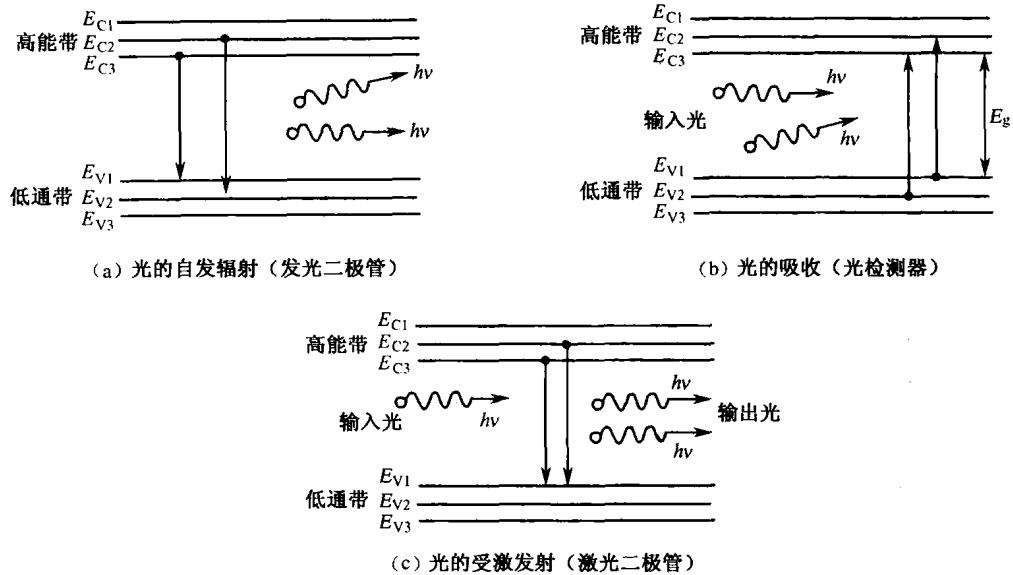


图 1.1.5 半导体中光的自发辐射、受激发射和吸收

1.1.3 光纤通信的优势

光纤通信与其他形式通信的主要区别有两点，一是载波频率很高，二是用光纤作为传输介质，其优势体现在以下几个方面。

1. 信道带宽极宽，传输容量大

随着社会信息化进程的发展，人们对通信的依赖程度越来越高，对通信系统运载信息能力的要求也日趋增强。有线通信从明线发展到电缆，无线通信从短波发展到微波和毫米波，都是试图通过提高载波频率来提高信道容量。而光纤中传输的光波是迄今为止使用频率最高的载波，其传输容量无疑也是最高的。

限于器件等技术因素的制约，目前光纤通信应有的通信能力并没有完全发挥出来。例如，理论上一根光纤可以同时传输近 100 亿路电话和 1000 万路电视节目，而实用水平为每对光纤传输 48 万多路电话信号。

在实际使用中，常使用组合光纤数不等的光缆，加之一些新技术的应用，如密集波分复用技术，其传输容量可以满足任何条件下信息传输的需要。

2. 中继距离长

所谓中继距离是指传输线路上不加放大器时信号所能传输的最大距离。当信号在传输线上传输时，由于传输线的损耗会使信号不断衰减，信号传输的距离越长，其衰减程度就越大。当信号衰减到一定程度后，对方就收不到信号了。为了延长通信的距离往往要在传输线路上设置一些放大器，也称为中继器，将衰减了的信号放大后再继续传输。显然，中继器越多，传输线的成本就越高，通信的可靠性也会降低。若某一中继器出现故障，就会影响全线的通信。

在通信系统设计中，传输线路的损耗是主要考虑的基本因素，表 1.1 列出了电缆和光纤每千米传输损耗。可见，光纤的传输损耗较之电缆要小很多，所以能实现很长传输的中继距离。在 1550nm 波长区，光纤的衰减系统可低至 0.2dB/km。它对降低通信成本，提高通信的可靠性及稳定性具有特别重大的意义。目前，光纤组成的光纤通信系统最大传输中继距离可达 200 多千米，而同轴电缆系统的最大传输中继距离仅为 6km。

表 1.1 光纤和电缆的损耗比较

线路类型	损耗/dB/km
对称电缆	2.06 (4kHz 时)
细同轴电缆 ($\phi 1.2/4.4$)	5.24 (1MHz 时), 28.70 (30MHz 时)
粗同轴电缆 ($\phi 2.24/9.4$)	2.42 (1MHz 时), 18.77 (60MHz 时)
850nm 波长多模光纤	≤ 3
1310nm 波长多模光纤	<1
1310nm 波长单模光纤	0.36
1550nm 波长单模光纤	0.2

3. 抗干扰

干扰是影响通信质量的重要原因。通信系统的干扰源很多，有天然干扰源，如雷电、电离层的变化和太阳黑子活动等；有工业干扰源，如电动机和高压电力线，还有无线通信的相互干扰等。干扰对通信系统的影响是通过干扰信号频谱落在通信系统工作频谱范围内产生的。为了降低干扰的影响，人们采取了数字通信、差错控制编码等措施，但并不能完全消除干扰对通信指标的劣化。而光纤中传输的光信号特定的频率范围，使它不易受各种电磁干扰的影响。同时光纤是由高纯度的二氧化硅材料制成的，不导电，也无电感效应，所以光纤通信系统可以从根本上解决多年来困扰人们的干扰问题。

4. 保密性好

保密性好是对通信系统又一重要要求。保密要求已从国家政治、军事、经济情报等领域扩展到企业经济、技术乃至个人通信领域。对信息的窃取通常有三个途径：一是直接接入式窃听；二是窃听计算机和终端设备辐射的电磁场；三是窃听电缆源辐射的电磁场。对于第一种窃听可以采取保密口令，信息加密等技术；对于第二种窃听可以采取加强电磁屏蔽措施，但电缆系统的完全屏蔽通常是比较困难的。现代侦听技术已能做到在离同轴电缆几千米的地方窃听电缆中

传输的信号。但光波在光纤中传输，不易泄漏出来，难以用传统的方法窃听其中的信息，同时，它也不会干扰其他通信设备的正常工作。

5. 节约有色金属

光纤的主要原材料是来源丰富的二氧化硅。据测量，从上海至北京敷设一条电缆线路需要用铜 800 吨，铅 300 吨。如果用光纤代替铜、铅等有色金属。在保持同样的传输容量下，仅需要 10 公斤石英。因此，光纤通信技术的推广将节约大量的金属材料，具有合理使用地球资源的意义。

除上述列举的优势外，光纤还具有线径细、重量轻、寿命长等优点。光缆的直径很小，144 芯光缆横截面直径不到 18mm，而标准同轴电缆为 47mm，利用光纤这个特点可以解决地下管道拥挤问题。由于光纤的重量轻，它被应用于飞机制造，不但降低了通信设备的成本和飞机制造的成本，而且提高了通信系统的抗干扰能力和飞机设计的灵活性。

由于光纤通信的诸多优点，除了在公用通信和专用通信中使用外，它还在其他许多领域，如测量、传感、自动控制及医疗卫生等方面得到了广泛的应用。

光纤本身也存在一些缺陷。光纤在生产过程中其表面存在微裂纹，从而使光纤的抗拉强度低；光纤的连接必须使用专门的工具和仪表，光分路、耦合不是十分方便，光纤弯曲半径不能太小等，但这些缺陷的影响在实际工程和维护工作中都可以避免或解决。

1.2 光纤通信系统的基本单元

在上节中，我们已经对光纤通信系统的构成进行了初步介绍。光纤通信系统是由光发射机、光纤和光接收机三个基本单元构成的，本节将进一步讨论这三部分的功能。

1.2.1 光发射机

1. 光源及其调制方式

如前所述，光发射机由将带有信息的电信号转换成光信号的转换装置和将光信号送入光纤的传输装置组成，而光源是光发射机的核心部件。目前光纤通信系统中常用的光源有发光二极管 LED 和激光器 LD 两种。这两种器件都是用半导体材料制成的，其主要参数和性能的比较如表 1.2 所示。

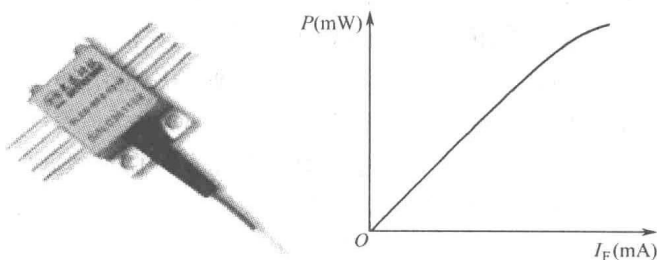
表 1.2 LED 与 LD 的比较

项 目	LED	LD
调制速率	几十兆赫兹	几吉赫兹
输出光功率	几毫瓦	几十毫瓦
光谱宽度	宽	窄
驱动电路	简单	复杂
温度影响	小	大
寿命	1×10^6 小时	1×10^5 小时
应用	低速、短距离	高速、长距离

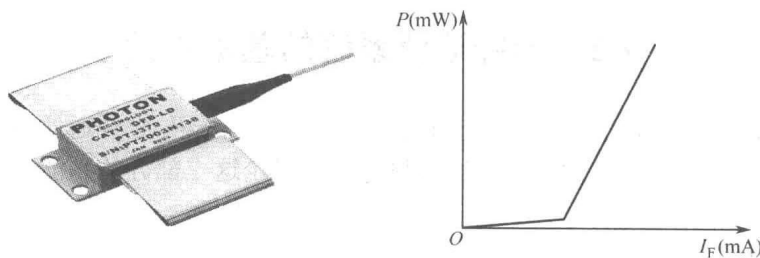
光纤通信系统对光源的要求有以下几个方面：

- ① 光源发射的峰值波长必须位于光纤低损耗窗口之内，即为 850nm, 1310nm 和 1550nm。
- ② 输出的光功率要足够高并且稳定。
- ③ 电光转换效率高，驱动功率低，寿命长，可靠性高。
- ④ 单色性和方向性好，以减小光纤材料色散效应，提高光源和光纤的耦合效率。
- ⑤ 调制特性好，响应速度快，以利于高速率、大容量数字信号的传输。
- ⑥ 输出特性（功率与电流的特性曲线）的线性度较高，可减小模拟调制时的非线性失真。

图 1.2.1 示出了 LED 和 LD 的外形图和输出特性。对于 LD 而言，当驱动电流由零开始增加时，输出功率增加并不多。只有当驱动电流大于阈值 I_{th} 后，输出光功率才明显增加。随着驱动电流的增加，输出光功率的增加很快。对于 LED 而言，其输出特性基本呈线性。



(a) LED 外形图和输出特性



(b) LD 外形图和输出特性

图 1.2.1 光源的外形和特性

输入到光发射机的电信号要转换成适合驱动光源的电流信号后，才能加到光源上。电流信号可以是模拟信号（如有线电视系统中使用的视频信号），也可以是数字信号（如计算机数据）。由于光源输出的光功率与驱动电流的关系可知，当输入信号是模拟信号时，选择合适的工作点，可以得到变化规律相同的光功率信号。显然，输出特性的线性度越高，电光转换时的失真就越小。图 1.2.2 (a) 示出了模拟信号对光源调制的工作过程，图 (b) 为数字信号对光源的调制过程。

在此需要说明消光比的概念。消光比 (Extinction Ratio) 是分别代表逻辑 1 和逻辑 0 的最大功率和最小功率之比，通常以 dB 为单位来衡量，它是数字传输时光源的一项重要参数。作为一个调制好的光源希望全 0 码时没有光功率输出，否则它将使光纤系统产生噪声，造成接收机灵敏度降低。需要说明的是，我国对消光比的传统定义与上述刚好相反。

电信号对光源的调制有两种方式：一种称为直接强度调制 (Intensity Modulation)，如图 1.2.2 表明的那样，即用电信号对光源的注入电流进行调制，然后使输出光波的强度随调制信号而变化。图 1.2.3 (a) 为直接强度调制器原理框图。直接调制光载波的方式用得比较多，

但由于它本质上是电领域的调制方式，所以受激光二极管调制特性的限制。当光纤通信向大容量高速化方向发展时，半导体光源本身的调制特性满足不了要求，则需要采用另一种调制方式——外调制方式来达到目的。图 1.2.3 (b) 示出了使用外调制器的光信号调制原理图。

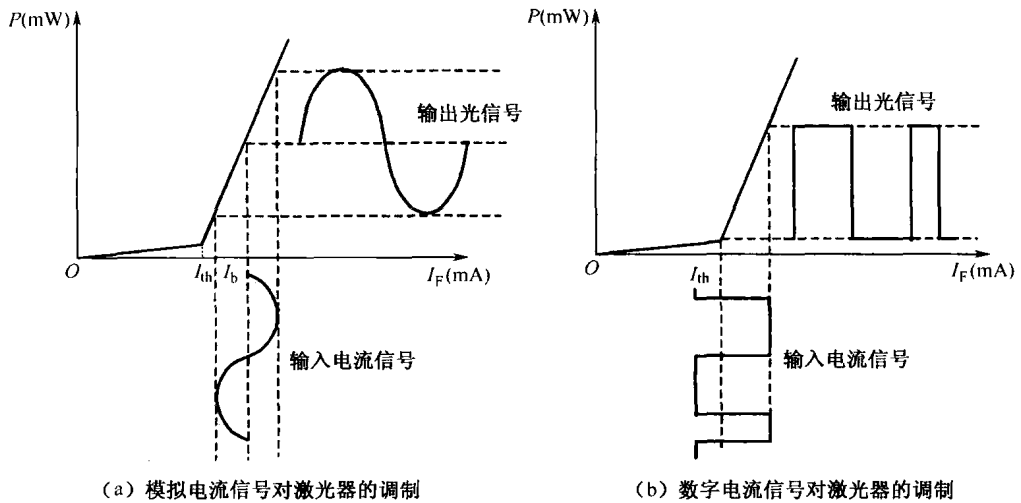


图 1.2.2 电信号对光源的调制过程

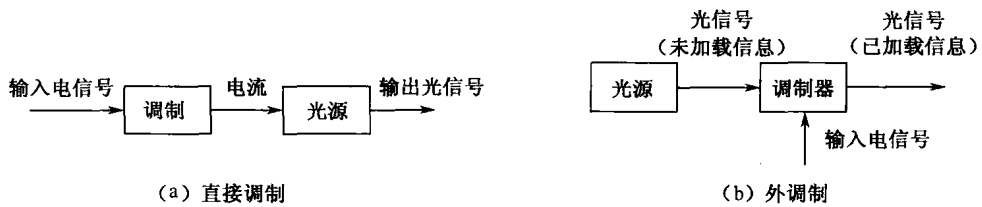


图 1.2.3 直接调制与外调制的原理图

外调制器是利用晶体的电光、磁光和声光等效应对光辐射进行调制，即在光源光辐射产生后再加载调制信号。外调制器放置在光源输出端的光路上，在调制器上加调制电压后，使激光器输出的连续波，通过调制器转换成随时间变化的光输出信号。

目前在光纤通信系统使用的外调制器通常是铌酸锂 (LiNbO_3) 电光调制器。它采用了一个集成光学马赫-曾特 (Mach-Zehnder) 构成，简称为 M-Z 调制器，图 1.2.4 示出了一种双电极驱动构成的铌酸锂光调制器的电光路框图。

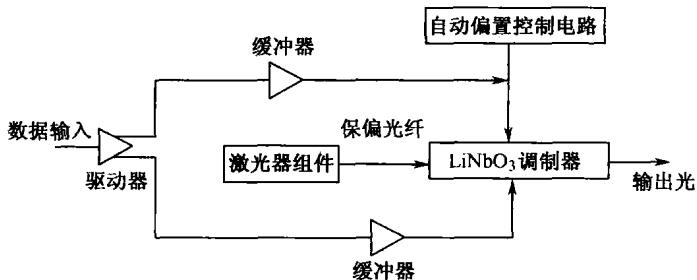


图 1.2.4 双电极驱动构成的 LiNbO_3 光调制器的电光路框图