

信息与电子学科百本精品教材工程

新编电气与电子信息类本科规划教材

光纤通信

王辉 主编 王平 于虹 副主编

张明德 主审

<http://www.f>

29.11
3



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

新编电气与电子信息类本科规划教材

光纤通信

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、光纤通信新技术等。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. —北京: 电子工业出版社, 2004.8

新编电气与电子信息类本科规划教材

ISBN 7-121-00202-7

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 (2004) 第 078932 号

责任编辑: 王 颖

印 刷: 北京大中印刷厂

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

经 销: 各地新华书店

开 本: 787×1092 1/16 印张: 17.25 字数: 442 千字

印 次: 2004 年 8 月第 1 次印刷

印 数: 5 000 册 定价: 22.50 元

凡购买电子工业出版社的图书, 如有缺损问题, 请向购买书店调换。若书店售缺, 请与本社发行部联系。
联系电话: (010) 68279077。质量投诉请发邮件至 zllts@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

信息与电子学科百本精品教材工程

《新编电气与电子信息类本科规划教材》
电子信息类专业教材编委会

主任委员：鲍泓（北京联合大学）

副主任委员：徐科军（合肥工业大学）

江国强（桂林电子工业学院）

秦会斌（杭州电子工业学院）

胡先福（电子工业出版社）

委员：崔桂梅 陈新华 陈启祥 段吉海 黄智伟 胡学龙
(按拼音排序)

李霞 李金平 孙丽华 谭博学 王辉 袁家政

姚远程 邹彦 周德新 周宇 张恩平 王颖

编辑出版组

主任：胡先福

成员：王颖 凌毅 韩同平 张孟玮

冉哲 李岩 李维荣 张昱

《新编电气与电子信息类本科规划教材》参编院校

(按拼音排序)

- | | | |
|------------|------------|------------|
| ▶ 安徽大学 | ▶ 华北电力大学 | ▶ 山东理工大学 |
| ▶ 北京联合大学 | ▶ 淮海工学院 | ▶ 山东科技大学 |
| ▶ 北华大学 | ▶ 桂林电子工业学院 | ▶ 青岛大学 |
| ▶ 常州工学院 | ▶ 桂林工学院 | ▶ 上海第二工业学院 |
| ▶ 成都理工大学 | ▶ 广西工学院 | ▶ 上海海运学院 |
| ▶ 哈尔滨工程大学 | ▶ 济南大学 | ▶ 太原理工大学 |
| ▶ 杭州电子科技大学 | ▶ 南京邮电学院 | ▶ 太原重型机械学院 |
| ▶ 合肥工业大学 | ▶ 南京工业大学 | ▶ 天津理工大学 |
| ▶ 合肥电子工程学院 | ▶ 南昌大学 | ▶ 厦门大学 |
| ▶ 湖北工业大学 | ▶ 南华大学 | ▶ 西南科技大学 |
| ▶ 湖南科技大学 | ▶ 南通大学 | ▶ 西安建筑科技大学 |
| ▶ 河海大学 | ▶ 内蒙古科技大学 | ▶ 武汉工业学院 |
| ▶ 河北工业大学 | ▶ 山东大学 | ▶ 云南大学 |

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。无论是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，无论是陆地还是海洋，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，突出工作特性以及产品技术规范，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以及分布模式，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、应用以及光发射机的组成，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以及它们的应用方法，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。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。第 10 章介绍了光纤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

2004 年 6 月于南京

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 光纤通信的概念	2
1.1.1 什么是光纤通信	2
1.1.2 光纤通信中光的作用及特性	2
1.1.3 光纤通信的优势	5
1.2 光纤通信系统的基本单元	7
1.2.1 光发射机	7
1.2.2 光纤	11
1.2.3 光接收机	12
1.2.4 光放大器	14
1.3 光纤通信的基本问题	15
1.3.1 衰减	15
1.3.2 色散	17
1.3.3 非线性效应	20
1.4 光纤通信系统的主要性能指标	21
1.4.1 比特率和带宽	21
1.4.2 传输距离	22
1.4.3 通信容量	23
1.5 光纤通信技术的回顾和展望	24
1.5.1 回顾	24
1.5.2 趋势	25
本章小结	26
习题	27
第 2 章 光纤	29
2.1 光纤结构	30
2.1.1 阶跃折射率光纤	30
2.1.2 渐变折射率光纤	31
2.2 光纤传输原理	31
2.2.1 几何光学分析法	31
2.2.2 波动方程分析法	35
2.3 单模光纤	47
2.3.1 单模传输条件及模场分布	47
2.3.2 单模光纤的衰减	49
2.3.3 单模光纤的色散与带宽	49
2.3.4 色散补偿方案	52

2.3.5	单模光纤的非线性效应	54
2.4	多模光纤	57
2.4.1	多模光纤的衰减	57
2.4.2	多模光纤的色散	58
2.4.3	多模光纤的带宽	59
2.5	光纤使用特性和产品介绍	59
2.5.1	光纤制作工艺	59
2.5.2	光纤的使用特性	62
2.5.3	光纤产品介绍	64
2.5.4	光纤的型号	65
	本章小结	66
	习题	67
第 3 章	光源和光发射机	69
3.1	激光二极管	70
3.1.1	工作原理	70
3.1.2	LD 的性质	74
3.1.3	LD 的类型	78
3.1.4	LD 组件及其技术指标	80
3.2	发光二极管	81
3.2.1	LED 结构	81
3.2.2	LED 特性	83
3.2.3	LED 与光纤的耦合	84
3.2.4	LED 的技术参数	86
3.3	光发射机	86
3.3.1	模拟光发射机	86
3.3.2	数字光发射机	87
3.4	外调制器	89
3.4.1	外调制器特点和类型	89
3.4.2	外调制器工作原理	91
3.4.3	外调制器技术指标	92
	本章小结	93
	习题	93
第 4 章	光检测器和光接收机	95
4.1	光检测器的工作原理	96
4.1.1	PIN 光检测器	96
4.1.2	APD 光检测器	97
4.2	光检测器的特性参数	99
4.2.1	光检测器性能参数	99
4.2.2	光检测器的噪声	101
4.2.3	光检测器产品介绍	102

4.3	光接收机	103
4.3.1	光接收机的组成	103
4.3.2	光接收机的技术指标	105
4.4	光收发合一模块	109
	本章小结	111
	习题	112
第5章	光网络器件	113
5.1	光放大器	114
5.1.1	概述	114
5.1.2	半导体光放大器	117
5.1.3	掺杂光纤放大器	119
5.1.4	拉曼光纤放大器	125
5.1.5	光放大器的应用	127
5.2	无源器件	129
5.2.1	耦合器	129
5.2.2	滤波器	133
5.2.3	隔离器	137
5.2.4	环形器	138
5.2.5	衰减器	139
5.2.6	连接器	139
5.2.7	光开关	141
	本章小结	143
	习题	143
第6章	光纤通信系统的设计	145
6.1	设计原则	146
6.1.1	工程设计与系统设计	146
6.1.2	系统设计的内容	146
6.1.3	系统设计的方法	148
6.2	数字传输系统的设计	150
6.2.1	技术考虑	150
6.2.2	光通道功率代价、损耗及色散预算	151
6.3	模拟传输系统的设计	153
6.3.1	系统组成及其评价	153
6.3.2	光放大器对系统性能的影响	156
6.4	光纤系统实例	157
6.4.1	设备互联方案	157
6.4.2	数据/视频光端机在闭路监控系统中的应用	157
6.4.3	多通道业务光端机的应用	159
	本章小结	160
	习题	160

第 7 章 光缆线路的施工和测试	163
7.1 光缆	164
7.1.1 光缆的结构与类型	164
7.1.2 光缆的技术规范	166
7.2 光缆施工	168
7.2.1 施工准备工作	168
7.2.2 室外光缆敷设	169
7.2.3 室内光缆敷设	173
7.2.4 光缆接续与成端	173
7.3 常用仪器	175
7.3.1 光时域反射仪	175
7.3.2 光谱分析仪	177
7.3.3 光纤熔接机	177
7.3.4 光源与光功率计	178
7.4 测试和故障检修	179
7.4.1 光特性测试	180
7.4.2 电特性测试	180
7.4.3 故障检修	181
本章小结.....	182
习题.....	182
第 8 章 波分复用技术	185
8.1 WDM 工作原理.....	186
8.1.1 WDM 工作原理	186
8.1.2 WDM、DWDM 与 CWDM	187
8.2 WDM 系统的基本组成.....	189
8.3 WDM 系统中的关键器件.....	189
8.3.1 WDM 系统中的光源	189
8.3.2 WDM 系统中的接收机	194
8.3.3 WDM 系统中的光放大器	194
8.3.4 WDM 系统中的波分复用器/解复用器	198
8.3.5 WDM 系统中的光纤	207
8.4 波分复用系统规范	210
8.4.1 光波长的分配	210
8.4.2 光接口规范	210
本章小结.....	211
习题.....	211
第 9 章 光纤网络	213
9.1 网络历史回顾	214
9.2 光纤网络基本知识	215
9.2.1 光纤网络的拓扑结构	215

9.2.2	光纤网络的物理构件	218
9.2.3	网络分层体系结构——OSI 参考模型	218
9.3	基于光纤系统的三大网络	219
9.3.1	光纤计算机通信网	219
9.3.2	光纤电话网	223
9.3.3	有线电视网	224
9.4	光纤接入网	226
9.4.1	光纤接入网的形式和业务类型	226
9.4.2	无源光网络 (PON)	227
9.5	光纤网络传输体制	230
9.5.1	概述	230
9.5.2	SDH/SONET 的基本概念	231
9.5.3	SDH/SONET 结构	233
9.5.4	SDH /SONET 设备	235
9.6	多波长光纤网络	236
9.6.1	WDM 光网络构成	236
9.6.2	WDM 光网络的分层	236
9.6.3	WDM 全光网络关键器件	237
	本章小结	241
	习题	241
第 10	光纤通信新技术	243
10.1	相干光通信	244
10.1.1	相干检测原理	244
10.1.2	调制与解调	245
10.1.3	接收灵敏度	246
10.1.4	相干光通信的关键技术	246
10.1.5	相干光通信的优点及其应用	247
10.2	光孤子通信	248
10.2.1	光孤子通信的基本原理	248
10.2.2	光孤子通信系统	249
10.3	光时分复用	251
10.3.1	光时分复用原理	251
10.3.2	光时分复用的关键技术	253
10.3.3	光时分复用的特点	253
10.4	光码分多址	254
10.4.1	光码分多址的基本原理	254
10.4.2	光码分多址的关键技术	255
10.4.3	光码分多址的特点	256
10.5	自动交换光网络	256
10.5.1	自动交换光网络的体系结构	257

10.5.2 自动交换光网络的组网方案	258
10.5.3 自动交换光网络的关键技术	259
10.5.4 自动交换光网络的优点	260
10.5.5 自动交换光网络存在问题及发展现状	260
本章小结	261
习题	261
参考文献	262

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。

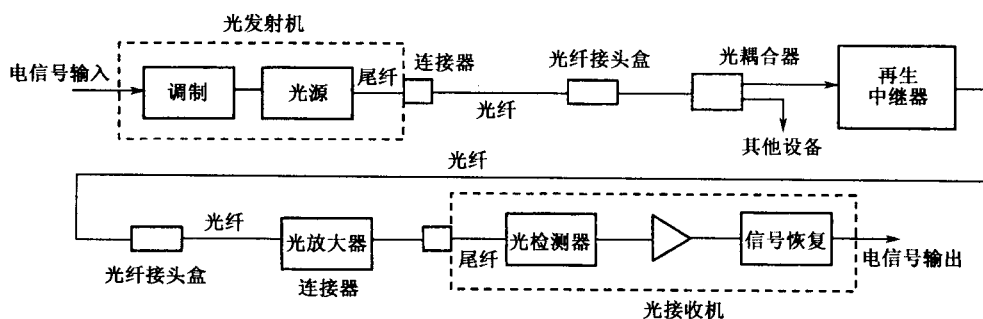


图 1.1.1 光纤通信系统的构成

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。

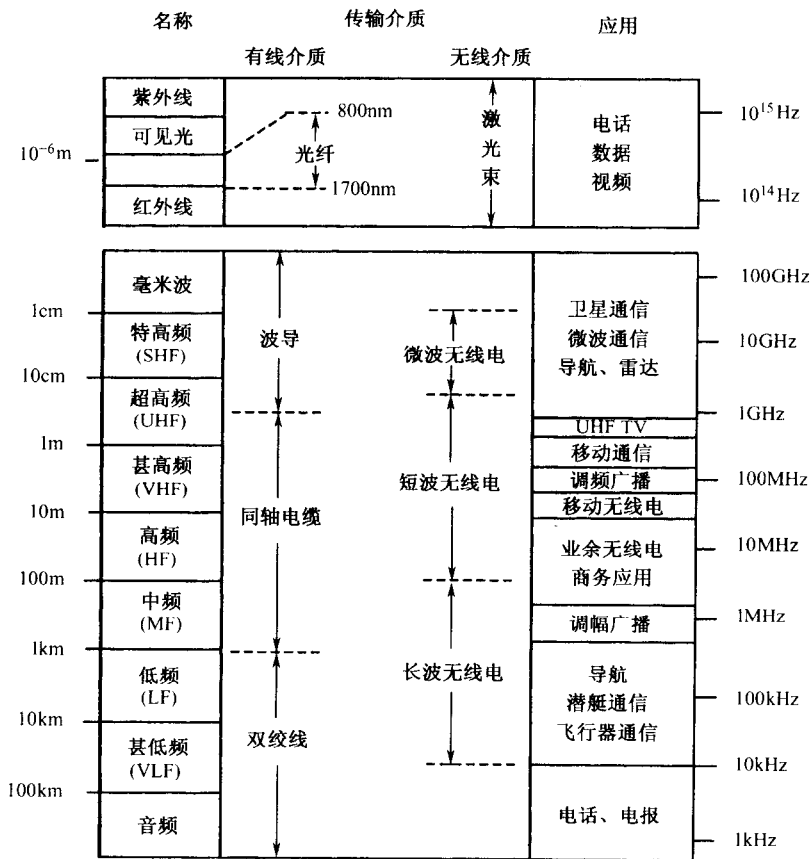


图 1.1.2 通信系统电磁波谱

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 $3 \sim 3 \times 10^6$ 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。

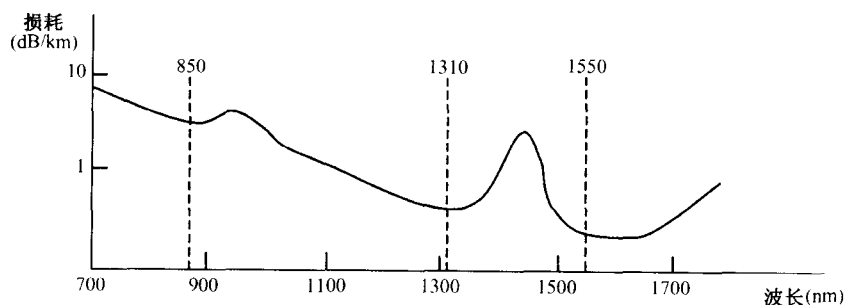


图 1.1.3 光纤损耗的波长特性

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。

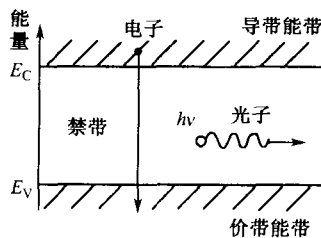


图 1.1.4 能带图

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。

光探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。

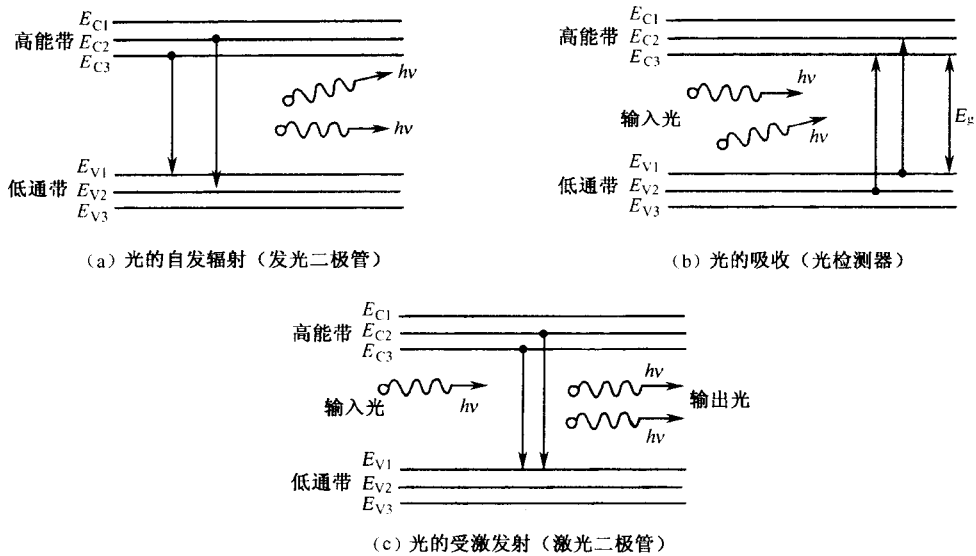


图 1.1.5 半导体中光的自发辐射、受激发射和吸收

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。