



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

光纤通信

(第三版)

张宝富 苏洋 王海潼 编著◎



西安电子科技大学出版社
<http://www.xduph.com>

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

光 纤 通 信

(第 三 版)

张宝富 苏 洋 王海潼 编著
刘增基 主审

西安电子科技大学出版社

内 容 简 介

本书内容涉及光纤通信领域的多个方面,具体包括传输光纤、半导体光源和光检测器、无源光器件、光放大器、光纤通信系统的组成部件及系统设计、SDH 和 WDM 光网络的基本组成原理以及光纤通信常用测试仪表的基本原理及测试方法等。

本书最大的特点是内容的选取兼顾了已被广泛使用的最具代表性的光纤通信技术和现代光纤通信的最新进展,同时所选内容具有相对的稳定性,是进一步深入学习和掌握光纤通信新技术的基础。

本书是光纤通信的一本基础性教材,也是一本普及性读物。它可作为高等院校电子信息工程、通信工程、广播电视等相关专业的本科教材和有关光纤通信的自考、函授教材,也可作为光纤通信的教学训练和技术培训教材以及广大科技人员的自学用书。

* 本书配有电子教案,需要者可登录西安电子科技大学出版社网站,免费下载。

图书在版编目(CIP)数据

光纤通信/张宝富,苏洋,王海潼编著. —3版. —西安:西安电子科技大学出版社,2015.2

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

ISBN 978-7-5606-3657-3

I. ① 光… II. ① 张… ② 苏… ③ 王… 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(2015)第 022262 号

策 划 马乐惠

责任编辑 阎 彬 马乐惠

出版发行 西安电子科技大学出版社(西安市太白南路2号)

电 话 (029)88242885 88201467 邮 编 710071

网 址 www.xduph.com 电子邮箱 xdupfxb001@163.com

经 销 新华书店

印刷单位 陕西华沐印制科技有限责任公司

版 次 2015年2月第3版 2015年2月第9次印刷

开 本 787毫米×1092毫米 1/16 印张 16.75

字 数 389千字

印 数 35 001~38 000册

定 价 30.00元

ISBN 978-7-5606-3657-3/TN

XDUP 3949003-9

*** 如有印装问题可调换 ***

本社图书封面为激光防伪覆膜,谨防盗版。

序

第三次全国教育工作会议以来,我国高等教育得到空前规模的发展。经过高校布局和结构的调整,各个学校的新专业均有所增加,招生规模也迅速扩大。为了适应社会对“大专业、宽口径”人才的需求,各学校对专业进行了调整和合并,拓宽专业面,相应的教学计划、大纲也都有了较大的变化。特别是进入 21 世纪以来,信息产业发展迅速,技术更新加快。面对这样的发展形势,原有的计算机、信息工程两个专业的传统教材已很难适应高等教育的需要,作为教学改革的重要组成部分,教材的更新和建设迫在眉睫。为此,西安电子科技大学出版社聘请南京邮电学院、西安邮电学院、重庆邮电学院、吉林大学、杭州电子工业学院、桂林电子工业学院、北京信息工程学院、深圳大学、解放军电子工程学院等 10 余所国内电子信息类专业知名院校长期在教学科研第一线工作的专家教授,组成了高等学校计算机、信息工程类专业系列教材编审专家委员会,并且面向全国进行系列教材编写招标。该委员会依据教育部有关文件及规定对这两大专业的教学计划和课程大纲,对目前本科教育的发展变化和相应系列教材应具有的特色和定位以及如何适应各类院校的教学需求等进行了反复研究、充分讨论,并对投标教材进行了认真评审,筛选并确定了高等学校计算机、信息工程类专业系列教材的作者及审稿人。

审定并组织出版这套教材的基本指导思想是力求精品、力求创新、好中选优、以质取胜。教材内容要反映 21 世纪信息科学技术的发展,体现专业课内容更新快的要求;编写上要具有一定的弹性和可调性,以适合多数学校使用;体系上要有所创新,突出工程技术型人才培养的特点,面向国民经济对工程技术人才的需求,强调培养学生较系统地掌握本学科专业必需的基础知识和基本理论,有较强的本专业的基本技能、方法和相关知识,培养学生具有从事实际工程的研发能力。在作者的遴选上,强调作者应在教学、科研第一线长期工作,有较高的学术水平和丰富的教材编写经验;教材在体系和篇幅上符合各学校的教学计划要求。

相信这套精心策划、精心编审、精心出版的系列教材会成为精品教材,得到各院校的认可,对于新世纪高等学校教学改革和教材建设起到积极的推动作用。

系列教材编委会

高等学校计算机、信息工程类专业 规划教材编审专家委员会

主任：杨震（南京邮电大学校长、教授）

副主任：张德民（重庆邮电大学通信与信息工程学院院长、教授）

韩俊刚（西安邮电学院计算机系主任、教授）

计算机组

组长：韩俊刚（兼）

成员：（按姓氏笔画排列）

王小民（深圳大学信息工程学院计算机系主任、副教授）

王小华（杭州电子科技大学计算机学院教授）

孙力娟（南京邮电大学计算机学院副院长、教授）

李秉智（重庆邮电大学计算机学院教授）

孟庆昌（北京信息科技大学教授）

周娅（桂林电子科技大学计算机学院副教授）

张长海（吉林大学计算机科学与技术学院副院长、教授）

信息工程组

组长：张德民（兼）

成员：（按姓氏笔画排列）

方强（西安邮电学院电信系主任、教授）

王晖（深圳大学信息工程学院电子工程系主任、教授）

胡建萍（杭州电子科技大学信息工程学院院长、教授）

徐祎（解放军电子工程学院电子技术教研室主任、副教授）

唐宁（桂林电子科技大学通信与信息工程学院副教授）

章坚武（杭州电子科技大学通信学院副院长、教授）

康健（吉林大学通信工程学院副院长、教授）

蒋国平（南京邮电大学自动化学院院长、教授）

总策划：梁家新

策划：马乐惠 云立实 马武装 马晓娟

电子教案：马武装

第一版前言

光纤俗称玻璃纤维,是由高纯度的玻璃棒经拉丝工艺制成的,它以其优良的传输特性已经成为信息社会最主要的信息传输手段。光纤到小区、光纤到办公桌、光纤布线、光纤网络等应用已遍布全球,这表明光纤通信已成为现代通信技术的主要支柱之一。越来越多的院校师生和科技人员由于学习和工作的需要或是自己的兴趣,需要了解和掌握光纤通信技术及其应用。为了使读者学习并掌握该技术,我们在多年教学和科研工作的基础上编写了这本书。

本书是光纤通信的一本基础性教材,也是一本普及性读物。它重点介绍光纤通信的基本原理,内容的选取兼顾了已被广泛使用的最具代表性的光纤通信技术和现代光纤通信的最新进展,同时所选内容具有相对的稳定性,是进一步深入学习和掌握光纤通信新技术的基础。其内容涉及光纤通信的理想传输介质——光纤、采用的理想半导体光源、光纤通信系统的组成部件及系统设计、SDH 和 WDM 以及光放大器的基本原理、光纤通信常用测试仪表的基本原理及测试等。

本书的内容共分 9 章。第 1 章:概述,介绍了光通信的概念、光信号的频谱、光纤通信的优点及光波技术基础。第 2 章:光纤,介绍了光纤与光缆的结构与简单的工艺,光纤传输特性,光纤中的光学现象。第 3 章:光源与光检测器,介绍了半导体激光器与光检测器的工作原理。第 4 章:无源光器件,介绍了构成光纤通信系统的无源光器件,如光纤连接器、波分复用器、光开关、光滤波器等。第 5 章:光放大器,介绍了光放大器的基本工作原理。第 6 章:光发送机与光接收机,介绍了光发送机(调制)与光接收机(解调)的工作原理。第 7 章:光纤通信系统及设计,介绍了两种典型系统——IM-DD 与 WDM+EDFA 的设计考虑及设计举例。第 8 章:SDH 与 WDM 光网络,介绍了 SDH 与 WDM 的组网原理、网络保护及网络管理等。第 9 章:光纤通信常用仪表及测试,介绍了常用光纤通信仪表,如光功率计、光衰减器、波长测试仪、OTDR、光谱分析仪等的工作原理及测试。

实验课程和相应的实验设施可以大大增强读者对光纤通信技术的理解。为了该课程的教学,作者经过多年潜心研究,研制了“光纤通信教学实验系统”并已经在许多院校的光纤通信教学中使用,收到了良好的教学效果。有需要者可与作者联系。

本书可作为电子信息工程、通信工程、广播电视等相关专业的本科教材和有关光纤通信的自考、函授教材，也可作为光纤通信的教学训练和技术培训教材以及广大科技人员的参考用书。

本书由张宝富、崔敏和王海潼合作编写。张宝富和王海潼编写了第1~6章，崔敏编写了第7~9章。由于光纤通信原理是一门理论性很强的课，因此作者在编写时力求理论叙述通俗易懂，概念定义清晰，尽量避免繁琐的公式推导，注重结论的物理含义、原理与实际应用的结合。

因作者水平有限，书中难免存在不足之处，欢迎读者批评指正。作者电子邮箱：zhangbaofu@163.com。

作 者

2003.10

第二版前言

本教材自 2004 年出版以来，已在全国许多高等院校使用。许多选用过本教材的老师和同学，通过各种方式提供了许多宝贵意见，为教材的修订工作奠定了基础。恰逢本教材入选普通高等教育“十一五”国家级规划教材之际，结合了光纤通信新的研究成果，作者对本教材的内容进行了修订，作了如下变动：

(1) 在保持原书风格的基础上，对重要的概念和数学公式进行了润色，修改了部分表达不清楚的概念，删除了部分繁琐的公式。

(2) 增加了光源驱动部分的内容，以增强理论与实际应用的结合，突出工程实践的特点。

(3) 删除了部分陈旧的内容和光纤通信测试标准。

(4) 重新调整、编写了 SDH 与 WDM 光网络的相关内容。

本教材的修订工作得到苏洋博士的支持，原编著者崔敏同志因工作调动未参与这次修订，在此对其在第一版中所做的贡献表示感谢。全书由张宝富负责统稿，其中第 1~5 章由张宝富、王海潼编写，第 6~9 章由王海潼、苏洋编写，第 11 章由苏洋编写。

由于作者水平有限，书中难免有错误和不当之处，欢迎读者批评指正。

编著者

2008 年 8 月

第三版前言

本教材自 2004 年出版以来,已在全国许多高等院校使用。许多选用过本教材的老师 and 同学,通过各种方式提供了许多宝贵意见,为教材的修订工作奠定了基础。时逢本教材入选普通高等教育“十一五”国家级规划教材之际,结合光纤通信新的研究成果,作者对本教材的内容进行了修订,作了如下变动:

(1) 在保持原书风格的基础上,对重要的概念和数学公式进行了润色,修改了部分表达不清楚的概念,删除了部分繁琐的公式。

(2) 增加了光源驱动部分的内容,以增强理论与实际应用的结合,突出工程实践的特点。

(3) 删除了部分陈旧的内容和光纤通信测试标准。

(4) 重新调整、编写了 SDH 与 WDM 光网络的相关内容。

本教材的修订工作得到苏洋博士的支持,原编著者崔敏同志因工作调动未参与这次修订,在此对其在第一版中所做的贡献表示感谢。全书由张宝富负责统稿,其中第 1~5 章由张宝富、王海潼编写,第 6~9 章由王海潼、苏洋编写。

由于作者水平有限,书中难免有错误和不当之处,欢迎读者批评指正。

编著者

2015 年 3 月

目 录

第 1 章 概述	1	2.5 光的波动性	28
1.1 光通信的基本概念	1	2.6 光纤介质的特性	29
1.1.1 光波在电磁频谱中的位置	1	2.7 光纤模式	30
1.1.2 激光器产生理想光波	2	2.7.1 模的概念	30
1.1.3 自由空间光通信(FSO)	3	2.7.2 多模光纤中的模式数目	33
1.1.4 光纤是理想的光波传输介质	4	2.7.3 单模光纤的传播模	34
1.2 光纤通信的优点	4	2.7.4 偏振模	34
1.3 光纤通信的系统组成	6	2.8 光纤的模式色散	34
1.4 光纤通信的回顾与展望	7	2.8.1 模间时延差	34
1.4.1 长波长激光器	8	2.8.2 模间色散的减少	35
1.4.2 单模光纤(SMF)	8	2.8.3 多模光纤的最大比特率	35
1.4.3 SDH 传输体制	8	2.9 单模光纤的波长色散或色度色散	36
1.4.4 光放大器	10	2.9.1 相速	36
1.4.5 WDM 复用技术	10	2.9.2 群速	36
1.4.6 全光网络	12	2.9.3 材料色散	37
1.5 光波技术基础	13	2.9.4 波导色散	37
1.5.1 光的波粒二象性	13	2.9.5 色散补偿	37
1.5.2 光与物质的相互作用	15	2.10 光纤损耗谱的波段划分	38
1.5.3 电介质的极化	16	2.10.1 损耗系数	38
1.5.4 光波的传播特性	17	2.10.2 光纤可用频谱	38
习题一	19	2.11 单模光纤	39
第 2 章 光纤	20	2.11.1 模场直径	39
2.1 光纤与光缆	20	2.11.2 单模光纤的分类及折射率剖面	39
2.1.1 光纤的结构	20	2.12 光纤的非线性效应	42
2.1.2 光纤的主要成分	21	2.12.1 自相位调制 SPM	42
2.1.3 光纤的制造工艺简介	21	2.12.2 四波混频 FWM	43
2.1.4 光缆的技术要求	22	2.12.3 受激布里渊散射 SBS	43
2.1.5 光缆的结构	23	2.12.4 受激拉曼散射 SRS	43
2.1.6 常用光缆的典型结构	23	2.13 光孤子的定性描述	44
2.2 光纤端面的折射率分布	25	习题二	44
2.3 光在光纤中的几何传输	26	第 3 章 光源与光检测器	46
2.3.1 反射和折射	26	3.1 半导体 LD 的工作原理	47
2.3.2 全反射定律	26	3.1.1 光放大	47
2.4 光纤的数值孔径 NA	27	3.1.2 F-P 腔半导体激光器	50
		3.2 光源的输出光功率	50

3.2.1 阈值特性	50	4.3.1 光开关的性能参数	82
3.2.2 注入电流(I)与光功率(P) 响应特性	51	4.3.2 主要的几种光开关	83
3.3 LD 的输出光谱	52	4.4 光纤光栅	84
3.3.1 多纵模 LD	52	4.4.1 光纤光栅的结构	85
3.3.2 单纵模 LD	53	4.4.2 布拉格光纤光栅 BFG	85
3.4 LD 的调制响应	53	4.4.3 长周期光纤光栅 LFG	85
3.5 LD 的温度特性与自动温度 控制(ATC)	55	4.5 光滤波器	86
3.6 LD 的输出光功率稳定性与自动 功率控制(APC)	56	4.5.1 F-P 腔型滤波器	86
3.7 DFB 和 DBR 激光器	57	4.5.2 M-Z 干涉滤波器	87
3.8 调谐激光器	59	4.5.3 阵列波导光栅(AWG)	88
3.8.1 外腔调谐激光器	59	4.5.4 声光可调谐滤波器(AOTF)	90
3.8.2 双电极半导体激光器	59	4.5.5 光纤光栅滤波器	91
3.9 其他类型的激光器	60	4.6 WDM 合波/分波器	92
3.9.1 垂直腔面发光激光器(VCSELs)	60	4.6.1 多层介质薄膜 MDTF	92
3.9.2 锁模激光器	60	4.6.2 熔锥型	93
3.9.3 量子阱(QW)激光器	62	4.6.3 光纤光栅型	93
3.9.4 多波长激光器阵列	62	4.7 光隔离器与光环行器	94
3.10 激光器组件	62	4.8 光锁相环与光纤非线性环境 NLOM	95
3.11 半导体 LED	63	习题四	96
3.11.1 LED 的结构	63		
3.11.2 LED 的特性	65	第 5 章 光放大器	97
3.12 光源与光纤的耦合	67	5.1 引言	97
3.13 光检测器	69	5.2 掺铒光纤放大器 EDFA	98
3.13.1 波长响应	69	5.2.1 EDFA 的放大原理	98
3.13.2 光电转换效率与响应度	70	5.2.2 EDFA 的组成结构	99
3.13.3 响应速度	71	5.2.3 EDFA 的增益与带宽	100
3.13.4 噪声	71	5.2.4 EDFA 的噪声类型	101
3.14 PIN	72	5.3 受激拉曼光纤放大器 SRA	102
3.15 APD	73	5.3.1 SRA 的放大原理	102
3.15.1 APD 的结构	73	5.3.2 SRA 的性能与应用	103
3.15.2 雪崩增益	74	5.4 受激布里渊光纤放大器 SBA	104
习题三	75	5.4.1 SBA 的放大原理	104
		5.4.2 SBA 的性能与应用	105
第 4 章 无源光器件	76	5.5 其他光纤放大器	105
4.1 光纤连接器	76	5.6 半导体光放大器 SOA	106
4.1.1 光纤连接损耗	76	5.6.1 SOA 的放大原理	106
4.1.2 光纤连接方法	77	5.6.2 SOA 的性能与应用	107
4.1.3 常用的几种连接器	79	5.7 光放大器的应用	108
4.2 光纤耦合器	80	5.8 光纤激光器	109
4.3 光开关	82	5.8.1 掺铒光纤激光器	109
		5.8.2 光纤光栅激光器	110
		5.8.3 光纤受激拉曼和受激布里渊 激光器	110

5.9 光波长变换器	111	7.2.4 微波副载波 SCM 多路传输	141
5.9.1 半导体光放大器(SOA)中的交叉 增益调制(XGM)技术	111	7.3 PCM 数字光纤通信系统	141
5.9.2 半导体光放大器中的交叉相位 调制(XPM)技术	112	7.3.1 系统构成	142
5.9.3 半导体光放大器中的四波混频 (FWM)技术	112	7.3.2 PDH 光纤通信系统	144
习题五	113	7.3.3 误码特性和抖动特性	146
第 6 章 光发送机与光接收机	114	7.4 IM-DD 数字光纤通信系统设计	149
6.1 调制信号的格式	114	7.4.1 总体设计考虑	149
6.1.1 单极性与双极性	114	7.4.2 设计方法	151
6.1.2 归零(RZ)与不归零(NRZ)	115	7.5 WDM+EDFA 数字光纤链路设计	156
6.1.3 扰码	116	7.5.1 总体设计考虑	156
6.1.4 线路码(4B/5B、8B/10B)	116	7.5.2 波长分配与通道间隔	159
6.2 直接调制 IM 光发送机	116	7.5.3 WDM 系统设计与性能	160
6.2.1 模拟调制与数字调制	116	习题七	163
6.2.2 光源的驱动电路	117	第 8 章 SDH 与 WDM 光网络	166
6.3 外调制器	120	8.1 SDH 光同步传送网	166
6.3.1 电折射调制器	120	8.1.1 SDH 的标准光接口	166
6.3.2 M-Z 型调制器	120	8.1.2 SDH 的速率体系	171
6.3.3 声光布拉格调制器	121	8.1.3 SDH 的帧结构	172
6.3.4 电吸收 MQW 调制器	121	8.1.4 SDH 的复用结构与原理	174
6.3.5 ASK/PSK/FSK 方式	122	8.1.5 SDH 设备	177
6.4 光接收机	123	8.1.6 SDH 的传送网结构与自愈	186
6.4.1 理想的数字光接收机	123	8.1.7 SDH 的网管功能	198
6.4.2 实际的光接收机	123	8.2 WDM 光网络	203
6.4.3 前置放大器噪声	124	8.2.1 光传送网的分层结构	203
6.4.4 APD 噪声	125	8.2.2 WDM 广播选择网	204
6.4.5 光放大器噪声	125	8.2.3 WDM 波长选路网 WRN	207
6.4.6 误码率	126	8.2.4 WRN 的选路算法	209
6.5 相干接收	130	8.2.5 WDM 的网管	211
习题六	133	8.3 其他类型的光网络	213
第 7 章 光纤通信系统及设计	135	8.3.1 光纤以太网	213
7.1 模拟光纤传输系统概述	135	8.3.2 无源光网络 PON	217
7.1.1 系统构成	135	8.3.3 HFC 混合光纤同轴网	220
7.1.2 模拟调制技术	135	8.3.4 光因特网(IP over WDM)	222
7.1.3 主要的噪声和信噪比	136	习题八	224
7.2 典型的模拟光纤通信系统	136	第 9 章 光纤通信常用仪表及测试	227
7.2.1 基带直接强度调制	136	9.1 引言	227
7.2.2 多信道传输	137	9.2 光纤特性参数及测量	228
7.2.3 VSB-AM/FM 调制多路传输	139	9.2.1 光纤特性参数	228
		9.2.2 光纤损耗和色散测试	228
		9.2.3 光时域反射仪 OTDR	234
		9.3 光端机性能指标的测试	235

9.3.1 光功率计	235	9.6.2 光谱分析仪(OSA)及应用	250
9.3.2 光端机的测试	236	9.7 光衰减器及应用	253
9.4 光纤通信系统性能测试	243	9.8 网络分析仪及应用	254
9.4.1 误码性能及测试	243	习题九	255
9.4.2 抖动性能及测试	244		
9.5 误码测试仪与 SDH 传输分析仪	248	参考文献	258
9.6 波长计、光谱分析仪 OSA 及应用	249		
9.6.1 波长计	249		

第1章 概述

早在三千多年前,我国的周朝就有利用烽火台的火光传递信息的通信,这种通信主要用于报警、呼叫或特定的事件,是一种利用普通光的视觉光通信。1880年,贝尔发明了光电话,利用光束来传送语音。但是,受当时技术条件的限制,这种光电话没有真正的使用价值,尽管如此,贝尔仍然是用光束传输信息的前驱者。光电话问世后,光通信的进展很慢,沉寂了近一个世纪后,直至1960年,人类成功研制出世界上第一台激光器,为光通信提供了一个良好的光源(高频率、高输出功率、高的信号承载能力),使光纤通信的发展在实用化的道路上向前迈了一大步。1970年,低损耗光纤(20 dB/km)由美国康宁(Corning)公司研制成功,为光通信找到了一个优良的传输介质,又使光纤通信在实用化的道路上向前迈进了一大步,从此便进入了光纤通信迅猛发展的时代。目前,光纤通信的发展远远超出了人们的预期,它给通信领域带来了革命性的变革,并成为本世纪最伟大的技术成就之一。

本章首先阐明了光通信、光纤通信的基本概念及光纤通信与电缆通信相比所具有的优点,然后简要介绍了光纤通信的发展现状以及对未来的展望,最后介绍了学习光纤通信所需的光波基础知识,对于没有学过光波理论的读者是一个很好的补充。

1.1 光通信的基本概念

光通信是利用光波来传送信息的一种通信方式。光波的频率比目前电通信使用的频率高得多,因而其通信容量很大。

通信系统的通信容量与系统的带宽成正比。为了比较方便,通常系统的带宽用载频的百分比,即带宽利用系数来表示。例如,一个载波频率为100 MHz的无线电通信系统,如果带宽利用系数为10%,则系统带宽为10 MHz;而对于载频为10 GHz的微波通信系统,若带宽利用率仍为10%,则系统带宽为1 GHz。光波的频率一般在 $1 \times 10^{14} \sim 4 \times 10^{14}$ Hz范围内,在带宽利用率仍为10%的情况下,系统的利用带宽在100 000~400 000 GHz范围内,这是电通信无法比拟的。

1.1.1 光波在电磁频谱中的位置

光波实际上是一高频的电磁波。在讨论高频电磁波时,我们习惯采用波长来代替频率描述。波长与频率的关系为

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (1.1)$$

其中： λ 为电磁波的波长，其物理含义是电磁波在时间上变化一周，其波前在空间变化一周所行进的长度； c 为光波在自由空间中传播的速度，其值为 3×10^8 m/s； f 为电磁波的频率，其物理含义是交变电磁波在单位时间（每秒）变化的周期数。

对于光波来说，波长常用单位有微米 μm ($1 \mu\text{m} = 10^{-6}$ m)、纳米 nm ($1 \text{ nm} = 10^{-9}$ m)、埃 $\text{\AA}$ ($1 \text{\AA} = 10^{-10}$ m)。

图 1.1 给出了光波在电磁波频谱中的大体位置分布。无线电波的频率范围为 $3 \sim 300$ MHz，通常将频率为 $300 \text{ MHz} \sim 300 \text{ GHz}$ 范围的无线电波称为微波。光波的频率一般可达到 $10^{13} \sim 10^{14}$ Hz，对应的波长在 $10 \sim 100\,000$ nm 之间。可进一步将光波细分为红外线、可见光和紫外线。

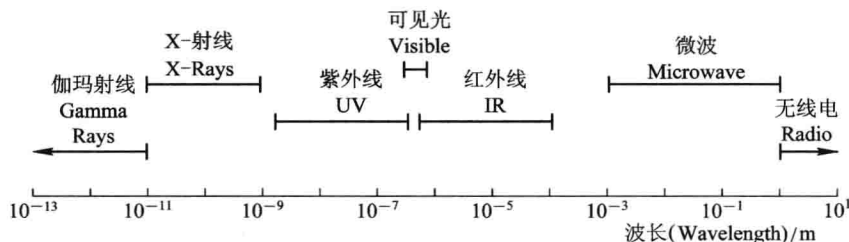


图 1.1 电磁波频谱图

红外线(波长 $> 0.76 \mu\text{m}$)：这一波段的波长比人眼实际可见的光的波长要长得多，可细分为近红外(波长为 $0.76 \sim 15 \mu\text{m}$)、中红外(波长为 $15 \sim 25 \mu\text{m}$)和远红外(波长为 $25 \sim 300 \mu\text{m}$)。这一波段的信号主要用于光波通信、红外制导、电子摄像及天文学。

可见光(波长位于 $0.39 \sim 0.76 \mu\text{m}$)：这一波段就是人眼实际可见的波长，像自然光源(如太阳光)和白炽灯、日光灯以及许多激光源(如 He-Ne 激光器)等装饰性的人造光源，它们发出的光都是人眼可见的可见光。

紫外线(波长 $< 0.39 \mu\text{m}$)：这一波段的波长比人眼实际可见的光的波长要短得多，这一波段的信号很少应用于通信。

目前光通信使用的波段主要是位于 $800 \sim 1600$ nm 的红外光。光纤通信所使用的光波波长大约为 $1 \mu\text{m}$ ，主要位于近红外波段。通常将小于 $1 \mu\text{m}$ 的红外波长称为短波长，将大于 $1 \mu\text{m}$ 的红外波长称为长波长。

1.1.2 激光器产生理想光波

早期的光通信，如用烽火台的火光传递简短的消息，贝尔的光电话利用太阳光来传递话音信号，它们所传送信息的容量小、距离短、可靠性低、设备笨重，究其原因这是由于采用了太阳光等普通光源。

1960 年 7 月 8 日，美国科学家梅曼(Maiman)发明了世界上第一台红宝石激光器。激光器发出的激光与普通光源发出的光相比，其光束的强度极高，方向性极好，光谱的范围小，相位和频率一致性好，其特性与无线电波类似，是一种理想的通信载波，可用来携带信息进行长距离传输。因此激光器的出现使得光通信进入了一个崭新的阶段。

激光一词是从英文 LASER 翻译过来的，而 LASER 一词是由英文“Light Amplification by

Stimulated Emission Radiation”中的首字母构成的,其含义是受激辐射光放大。由于其频率很高,可极大地提高通信容量,因此引起了通信工作者的广泛重视,使激光很快在通信领域得到应用。继红宝石激光器问世后,各种不同材料的激光器相继出现,如氦-氖激光器、二氧化碳激光器、氩离子激光器和半导体激光器等。

1.1.3 自由空间光通信(FSO)

激光器一问世,人们就模拟无线电通信进行了大气激光通信的研究,采用的激光源有氦-氖激光器和二氧化碳激光器等。由于发射功率很大,因此那时所需的激光器的体积相对较大,相应的设备较笨重。近年来大功率半导体激光器的研制成功,使得大气激光通信在实用化的道路上迈出了一大步。由于激光束是在自由空间传播的,因此大气激光通信又称为自由空间光通信(FSO)。目前,FSO在民用和军事通信中都具有重要作用,为建立全天候、具有高机动性和高灵活性、工作稳定可靠的信息传输平台开辟了广阔前景。这主要是由于它具有如下优点:

(1) 具有安装便捷、使用方便的特点,很适合于在特殊地形、地貌及有线通信难以实现和机动性要求较高的场所工作。

(2) 具有不挤占宝贵的无线电频率资源、电磁兼容性好、抗强电磁干扰能力强、保密性好等特点。

(3) 跟微波、毫米波通信相比,FSO系统在价格上也有较强的竞争优势,是一种易于被市场和用户接受的通信手段。

(4) 它是组建各种室内、室外局域网和最后 1000 m 接入的有效手段。因为它的合理应用,会使蜂窝网中宝贵的频率资源得到更加充分的利用,所以它对于城市中移动电话蜂窝网的建设和发展有着不可低估的价值。

(5) 它是未来实现卫星之间通信的有效手段,因此,在构筑外层空间通信网上,半导体激光自由空间通信将发挥重要的作用。

(6) 由于它利用极窄的激光束作为载波,传播的发散角非常小,不易捕获,保密性好,因此具有很好的军事应用前景。

虽然大气光通信与其他无线通信相比,具有如上的优点,但是由于它以大气作为光波的传输介质,因而存在致命的缺点,目前远未得到应有的发展和推广应用。FSO 主要存在以下的技术问题:

(1) 大气信道衰减随机变化量大(雨、雾、灰尘和自然辐射对光能的吸收和散射,使光能迅速衰减),需要补偿。

(2) 大气湍流现象(因大气中各处的密度和温度不同而引起的)使介质折射率发生不均匀的随机变化,其结果是使接收光斑发生所谓的闪烁现象和漂移现象。

(3) 需要功耗小,转换效率高,激光输出功率大,调制带宽较宽的激光发射器件。

(4) 需要灵敏度高,噪声特性好,适合于常温环境下工作的接收器件。

(5) 需要体积小,重量轻,光学特性好,便于安装、调整校准的光学收发天线。

(6) 需要背景噪声的滤除技术。

(7) 在机动性要求高和工作平台方位稳定性差的场合应用时需要自动跟踪瞄准。

1.1.4 光纤是理想的光波传输介质

FSO 虽然在机动性、灵活性方面具有优势,适合于大气层视距范围、星际之间、水下等特殊场合的通信,但用于长距离的陆地和海底通信显然不理想。然而光通信的许多优点驱使人们进一步探索光波新的传输介质。

为了克服大气对激光束的影响,人们将光波在大气中的传输转移到地下,如在金属或水泥管道内每隔一段距离安放一个反射镜,通过反射镜的反射使光波限制在管道内向前传输,如图 1.2 所示。这种方法虽然克服了大气对激光束的影响,但需要摆放许多反射镜,给实际的施工、维护带来诸多不便,而且每反射一次,光能就损耗一次,经过多次反射之后光能迅速降低,传输距离受到限制。与之类似的方法还有将反射镜换成透镜,这些方法虽然理论上是可行的,但无实际的应用价值。由于光通信在地上(大气光通信)和地下(反射镜传送)都不能理想地传送光波,因而其发展由于传输介质问题而出现了低潮。正在许多人对光通信的前途表示担忧时,英国标准远程通信实验室的英籍华人高锟博士(K. C. Kao)提出了大胆的设想,他认为电可以沿着导电的金属线向前传输,光也可以沿着可以导光的玻璃纤维,即光导纤维传输。光导纤维一词由英国的 Kapany 在 1956 年首次提出,他和另一个科技工作者在 1951 年就用纤维束进行了光传导实验,他们的研究工作促进了在医学领域中应用极广的柔性纤维镜(如胃镜)的发展。

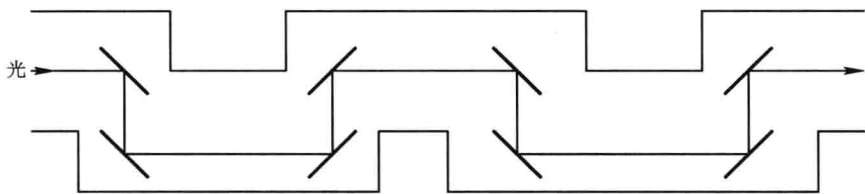


图 1.2 利用反射镜传送光束

20 世纪 60 年代,光导纤维的损耗很大,大于 1000 dB/km,使得光通信的传输距离限制在短距离内。1970 年,纽约康宁(Corning)玻璃厂的 Kapron、Keck 和 Maurer 发明了一种低损耗光纤,其损耗小于 20 dB/km,这是光通信发展进程中的又一重大突破。这种采用光导纤维(现简称为光纤)来传送光波的通信就是现在所说的光纤通信。自 1970 年以后,光纤技术以指数规律快速向前发展。1974 年,贝尔实验室发明了制造低损耗光纤的方法(称为化学气相沉积法 MCVD),并成功研制出了损耗为 1 dB/km 的光纤。1976 年,日本电话电报公司研制出更低损耗的光纤,损耗下降为 0.5 dB/km。20 世纪 80 年代后期,光纤损耗降低到了 0.16 dB/km。

1.2 光纤通信的优点

就在对光纤损耗的研究获得巨大突破的同时,美国贝尔实验室于 1970 年成功研制出可在室温连续工作的半导体激光器。与气体、液体、固体、离子等激光器相比,半导体激光器体积小,耗电少,通过改变注入电流可方便地实现对信号的调制,具有寿命长、可靠性