



普通高等教育“十一五”国家级规划教材



光纤通信 技术基础

陈根祥 路慧敏 陈 勇 宁提纲 编著



高等教育出版社
HIGHER EDUCATION PRESS

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

光纤通信技术基础

Guangxian Tongxin Jishu Jichu

陈根祥 主编

陈根祥 路慧敏 陈 勇 宁提纲 编著



高等教育出版社·北京
HIGHER EDUCATION PRESS BEIJING

内容提要

作为 20 世纪人类社会所取得的最伟大的技术成就之一,光纤通信技术已经发展成为人类向信息化时代迈进不可替代的重要基石,并正在经历以光纤到户和网络全光化为标志的重大技术变革。本书根据光纤通信技术的最新进展和未来发展趋势,对光纤通信所涉及的基本原理、物理概念、基础理论和实验技术进行了较为完整和深入的论述。全书大致可以分为光纤与光波导技术基本理论、光通信器件的理论与技术、光纤通信系统与网络技术、光纤与光纤通信系统测量及数学附录等几个主要的部分。内容涉及光纤通信技术的各主要方面。为适应不同层次和不同专业读者的学习和教学需要,上述各部分之间保持了相对的独立性。为了使能够巩固所学知识并培养其应用所学知识解决实际问题的能力,对在研究和开发工作中具有重要应用价值的有关数值分析方法进行了较详细的论述,并在每一章后配备了大量的基础性和知识延伸性习题。为适应研究型教学的需要,其中部分习题属于带有研究性质的大型习题,可供教师组织有兴趣的学生进行研讨与练习。

本书是普通高等教育“十一五”国家级规划教材,可作为通信工程、电子信息及应用物理类专业本科生和研究相关课程的教材使用,也可供通信领域的科研和工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

光纤通信技术基础/陈根祥主编. —北京:高等教育出版社,2010. 11

ISBN 978 - 7 - 04 - 030584 - 5

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

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 190067 号

策划编辑 吴陈滨 责任编辑 许海平 封面设计 张楠 责任绘图 尹莉
版式设计 余杨 责任校对 杨雪莲 责任印制 张泽业

出版发行 高等教育出版社
社址 北京市西城区德外大街 4 号
邮政编码 100120

经销 蓝色畅想图书发行有限公司
印刷 北京机工印刷厂

开本 787 × 1092 1/16
印张 32.75
字数 800 000

购书热线 010 - 58581118
咨询电话 400 - 810 - 0598
网址 <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>
网上订购 <http://www.landaco.com>
<http://www.landaco.com.cn>
畅想教育 <http://www.widedu.com>

版次 2010 年 11 月第 1 版
印次 2010 年 11 月第 1 次印刷
定价 51.00 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

物料号 30584 - 00

前言

由于光纤的巨大信息承载能力,自 20 世纪 70 年代初第一根低损耗光纤问世以来,光纤通信技术即一直以惊人的速度发展,并推动了信息技术领域的诸多重大变革。目前,光纤几乎延伸至世界的每一个角落,形成了遍布全球的陆上和海底光缆通信网,成为高速、长距离信息传送的主要载体,是互联网和宽带接入等现代通信技术得以快速发展的最主要的物质基础与技术支柱。由于这些原因,光纤通信被认为是 20 世纪人类所取得的最伟大的技术成就之一,是人类向信息化社会迈进的重要基石。

在过去的 40 余年里,在低损耗光纤、动态单纵模激光器、掺铒光纤放大器、色散管理、密集波分复用和全光信号处理等具有里程碑意义的重大技术进步的推动下,商用化光纤通信系统的传输速率已经从最初的 12.5Mb/s 提升到了目前的 Tb/s 量级,传输距离也从最初的 5~10km 增加到了目前的上万千米,系统传输容量(速率-距离积)一直呈指数式增长。这些发展不仅确立了光纤技术在通信领域的重要地位,而且为光纤通信技术的进一步发展开辟了非常广阔的空间。目前,以光交换、全光信息处理、光纤到户(fiber to the home, FTTH)和光纤到办公桌(fiber to the desk, FTTD)为标志的网络全光化进程正受到学术界和产业领域的高度重视,呈现出良好的发展前景。

由于光纤通信技术在现代通信领域的重要地位以及在推动全球信息化进程中的重要作用,目前“光纤通信技术”已经成为国内外许多大学的通信工程、物理电子学和光学工程等相关专业本科生和研究生的重要专业基础课程,并已有大量不同类型、层次和侧重的教材和著作出版。但由于光纤通信技术具有发展迅速、学术研究与工程应用结合紧密、所涉及的基础数理知识较为广泛、新器件和新技术不断涌现等特点,因此在有限的篇幅内对其所涉及的基础理论与各种前沿技术进行系统、全面和深入的论述是困难的。作为通信工程和应用物理类高年级本科生和研究生的一本基础性教材,本书在兼顾内容完整性和系统性的同时,更加注重对光纤通信技术基础理论体系和物理思想进行较为深入的论述,而将大量应用性内容作为基础理论知识的延伸编写为研究性大型习题供学生进行自主学习和研讨。从光纤通信技术目前的发展情况来看,对光纤技术基础物理内容的深刻理解与掌握,对于学生将来从事与光通信有关的工程应用、新器件与新模块的研究开发以及前沿学术研究等工作具有日益重要的作用。

本书是在作者长期从事本科生和研究生教学以及科研实践工作的基础上完成的。在内容组成与体系结构方面,本书大致可以分为光纤技术基础(第 1~7 章)、光通信器件技术基础(第 8~11 章)、光纤通信系统和网络(第 12~14 章)、光纤与光纤通信系统测量(第 15、16 章)以及附录等几个部分。内容基本上涵盖了从基础理论与器件物理到系统组成和网络体系结构,再到光纤和通信系统测量的光纤通信技术所涉及的各个主要方面。为适应不同专业和层次学生的学习与教学需要,上述各部分之间保持了相对的独立性,教师可根据实际情况进行选讲。全书力求理论

II 前 言

体系的完整与简洁、物理概念与技术思想的明晰以及理论结果与工程实际的紧密结合。为了使学生能够巩固所学知识并培养其应用所学知识解决实际问题的能力,书中对有关数值分析方法进行了较详细的论述,并在每一章后配备了大量的基础性和知识延伸性习题。为适应研究型教学的需要,其中部分习题属于带有研究性质的大型习题,教师可根据学生的学习情况组织学生进行研讨并引导学生自主完成。

本书的主要内容可概括如下:第1章引论部分阐述了人类从电通信时代演进至光通信时代的必要性、必然性及其技术基础的形成过程,并对光纤通信技术发展的历史和现状及其未来发展方向进行了简要的概括。其目的是使读者了解光纤通信技术产生与发展的全貌,在后续学习中能够做到有的放矢。作为光纤通信技术最重要的理论基础之一,第2章对Maxwell电磁理论以及与电磁波传播问题有关的若干重要理论问题进行了凝练与论述。第3章从最简单的一维平面光波导问题入手,给出了用几何光学和波动光学理论处理光波导问题的基本过程,并对一般光波导问题的数理本质、基本概念和数值化方法进行了阐述。第4章至第6章较为详细地介绍了光纤光学的基本理论,内容包括阶跃折射率光纤的严格矢量解法、弱导光纤的标量近似理论、模式的完备性、正交性和稳定性、微扰近似与耦合模方程的标量形式、光纤色散以及光纤中的光学非线性。第7章在讨论了光纤制造和成缆工艺中的若干理论和技术问题的基础上,对光纤损耗、中红外与同位素光纤和光纤的有关技术规范进行了分析与论述,并介绍了稀土光纤、光子晶体光纤、偏振保持光纤和塑料光纤等特种光纤及其制造技术。第8章至第11章详细给出了各种主要光通信器件的物理原理、理论模型、性能参数及必要的数值分析方法,内容包括耦合模理论的矢量形式、光纤耦合器、波分复用器、光纤接续技术、光环行器与隔离器、光纤光栅、掺铒光纤放大器、光纤拉曼放大器、光学滤波器、半导体激光器和放大器、发光二极管、光电二极管、雪崩光电二极管以及光电检测过程及其噪声特性等。第12章至第14章对光纤通信系统组成和光纤通信网所涉及的各种单元模块、网络体系结构和目前世界范围内正在受到高度重视的全光网技术及其发展进行了较为全面和系统的论述。第15章和第16章分别对在工程实际中具有重要应用价值的光纤与光纤通信系统测量技术以及光功率计、光时域反射计和光谱仪等重要的测量仪器、设备进行了介绍。

本书为普通高等教育“十一五”国家级规划教材,由北京交通大学陈根祥教授主编。其中第1~11章以及附录由陈根祥教授编写,第12、13章由路慧敏博士编写,第14章由陈勇博士编写,第15、16章由宁提纲教授编写。陈根祥教授对全书进行了最后的统一修改与定稿。

作者要特别感谢北京交通大学电子信息工程学院领导以及高等教育出版社的大力支持和帮助。天津大学于晋龙教授担任本书的主审,于教授对本书提出了许多宝贵意见。北京交通大学的童治博士、曹继红博士和魏槐博士对本书的编写工作也做出了很多贡献。没有这些支持与帮助,本书是无法顺利完成的。作者在此谨向他们表示最诚挚的谢意。

因作者精力和学识水平所限,本书尚有许多方面未能达至作者的初衷,谬误和不妥之处也一定难免,恳请读者提出宝贵意见,以利本书的进一步修订和完善。

作者

2010年6月于北京交通大学

基本物理常数表

圆周率	$\pi = 3.1415926535897932$
真空光速	$c = 2.99792458 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$
真空磁导率	$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H} \cdot \text{m}^{-1} (1\text{H} = 1 \text{ V} \cdot \text{s} \cdot \text{A}^{-1})$
真空介电系数	$\varepsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12} \text{ F} \cdot \text{m}^{-1} (1\text{F} = 1 \text{ C} \cdot \text{V}^{-1})$
电子电荷	$e = 1.6021892 \times 10^{-19} \text{ C}$
电子静止质量	$m_0 = 9.109534 \times 10^{-31} \text{ kg}$
Planck 常数	$h = 6.626176 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s} = 4.13619 \times 10^{-15} \text{ eV} \cdot \text{s}$ $\hbar = h/2\pi = 1.0545887 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s} = 1.678430 \times 10^{-16} \text{ eV} \cdot \text{s}$
Boltzmann 常数	$k = 1.380662 \times 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} = 8.617347 \times 10^{-5} \text{ eV} \cdot \text{K}^{-1}$
室温 kT 值 ($T = 300\text{K}$)	$kT = 25.85204 \text{ meV}$
光子能量对应波长	$\lambda [\mu\text{m}] = 1.23985/E [\text{eV}]$
电子伏特	$1 \text{ eV} = 1.6021892 \times 10^{-19} \text{ J}$
长度单位 Å	$1 \text{ Å} = 10^{-10} \text{ m} = 0.1 \text{ nm}$

目 录

第一篇 光纤技术基础

第1章 引论	3
1.1 电通信技术的发展	3
1.2 光通信的必要性及其技术基础	5
1.2.1 光通信的必要性与空间光通信	5
1.2.2 光纤技术的发展	6
1.2.3 模间色散与单模光纤技术	6
1.2.4 群速色散与动态单纵模激光器	7
1.3 光纤通信技术的历史、现状与未来	8
1.3.1 早期的 850nm 光纤通信系统	8
1.3.2 1.31 μm 光纤通信系统	8
1.3.3 1.55 μm 光纤通信系统	9
1.3.4 光纤通信网络体系结构	9
1.3.5 密集波分复用技术	9
1.3.6 外调制技术与光时分复用	10
1.3.7 网络全光化	10
1.3.8 光纤接入网	11
1.3.9 光纤通信技术的未来发展方向	11
习题	11

第2章 电磁理论基础	13
2.1 电磁现象的普遍规律	13
2.1.1 Maxwell 方程组	13
2.1.2 电磁场与物质之间相互作用的宏观描述	14
2.1.3 电磁场边值关系	15
2.1.4 Maxwell 方程组的物理含义	16

2.1.5 电磁场量纲系统	17
2.2 电磁场波动方程与电磁波	17
2.2.1 Maxwell 方程组的频域形式	17
2.2.2 频域波动方程	18
2.2.3 自由空间中的均匀平面波	19
2.2.4 波的相速度与群速度	20
2.2.5 介质的损耗与增益	21
2.3 电磁场的能量与能流	22
2.3.1 电磁场能量守恒定律	22
2.3.2 复数表示	23
2.4 光的反射与折射	24
2.4.1 Snell 定律	24
2.4.2 Fresnel 公式	25
2.4.3 重要结论	26
习题	27

第3章 一维平面光波导	30
3.1 一维平面光波导及其几何光学分析	30
3.1.1 一维均匀平面光波导的基本结构	30
3.1.2 模式及其特征方程	31
3.1.3 模式分类及数量	32
3.1.4 模式特征方程的具体形式	33
3.1.5 波导参数与模式截止特性	33
3.1.6 模式场分布	35
3.1.7 一个例子的数值计算结果	36
3.2 一维平面光波导的波动理论分析	38
3.2.1 光波导本征值问题	38
3.2.2 场方程及其束缚态解的形式	39
3.2.3 场分解与模式分类	39

II 目 录

3.2.4 TE 模的场分布与特征方程	40	4.4.5 线偏振模的特性曲线与功率 限制因子	70
3.2.5 TM 模的场分布与特征方程	41	4.5 无界抛物型折射率分布弱导光纤	72
3.3 若干重要概念及其内涵	42	4.5.1 折射率分布	72
3.3.1 光线、光波与光子	42	4.5.2 无界抛物型光纤中的模式场 分布	72
3.3.2 波导内电磁场的存在形态和 功率流	43	4.5.3 基模场分布与模场直径	73
3.3.3 模式的相速度与群速度	43	4.6 光波导中模式的普遍性质	74
3.3.4 模间色散与频率色散	44	4.6.1 传导模、辐射模与泄漏模	74
3.4 数值方法	45	4.6.2 光波导本征值问题	74
3.4.1 任意一维波导结构的场方程	45	4.6.3 模式的完备性与光场展开	75
3.4.2 有限差分方法	46	4.6.4 模式的正交性与归一化	76
3.4.3 传输矩阵方法	47	4.6.5 模式正交性的证明	77
习题	48	4.6.6 β^2 的稳定性	78
第 4 章 光纤模式理论	51	4.6.7 光波导不规则性与模耦合	78
4.1 光纤基本结构与分类	51	4.7 近似方法	80
4.1.1 光纤基本结构	51	4.7.1 变分法	80
4.1.2 折射率分布的主要类型	52	4.7.2 等效阶跃折射率近似	80
4.1.3 光纤的数值孔径与归一化 频率	53	4.8 单模光纤	82
4.1.4 多模光纤与单模光纤	53	4.8.1 概述	82
4.2 纵向均匀光波导中场的纵横关系	54	4.8.2 阶跃型单模光纤	82
4.2.1 纵向场与横向场	54	4.8.3 单模光纤的模场直径	83
4.2.2 纵向均匀光波导内场的纵 横关系	54	4.8.4 单模光纤中的随机双折射	86
4.3 阶跃光纤的严格矢量解	56	4.8.5 偏振保持光纤	87
4.3.1 阶跃光纤中电磁场的波动 方程	56	习题	88
4.3.2 场的纵向分量	57	第 5 章 光纤色散	94
4.3.3 横向场分量	58	5.1 光纤色散的来源	94
4.3.4 模式特征方程及矢量模的 分类	59	5.1.1 概述	94
4.3.5 矢量模的截止特性	60	5.1.2 多模光纤中的模式色散	94
4.3.6 光纤的单模传输条件	62	5.1.3 Sellmeyer 定律和材料色散	96
4.3.7 矢量模的特性曲线	63	5.1.4 波导效应所引起的色散	97
4.3.8 矢量模的场分布、简并性与 光功率密度分布	64	5.2 单模光纤的色散	98
4.4 阶跃型弱导光纤的标量近似理论	66	5.2.1 基本关系式	98
4.4.1 弱导光纤与线偏振模	66	5.2.2 群时延	99
4.4.2 线偏振模的特征方程	67	5.2.3 阶跃型单模光纤的色散	100
4.4.3 线偏振模的简并性及其与矢 量模的关系	68	5.2.4 单模光纤色散的一般描述	102
4.4.4 线偏振模的截止特性	69	5.3 单模光纤中的光信号传输	103
		5.3.1 频域分析	103
		5.3.2 光信号的时域传输方程	105
		5.3.3 光脉冲的色散展宽	105
		5.3.4 光脉冲的色散啁啾效应	106
		5.4 偏振模色散	107

5.4.1 偏振模色散的来源	107	6.6.1 光纤中光学孤立子的基本特性	142
5.4.2 偏振模色散的统计描述	108	6.6.2 各种非理想因素对光孤子传输特性的影响	145
习题	109	6.7 数值分析方法	147
第6章 光纤的非线性光学特性	113	6.7.1 分步傅里叶方法	147
6.1 光纤中光学非线性的一般理论描述	113	6.7.2 对称分步傅里叶方法	148
6.1.1 极化率张量	113	6.7.3 迭代的对称分步傅里叶方法	149
6.1.2 非线性折射率	114	习题	149
6.1.3 光纤非线性传输方程	115	第7章 光纤制造技术与光缆	153
6.1.4 受激非弹性散射过程	117	7.1 光纤制造技术	153
6.1.5 非线性响应速度与超快过程	117	7.1.1 基本原理及技术	153
6.1.6 光纤非线性的重要意义	119	7.1.2 内部气相沉积法	154
6.2 自相位调制	119	7.1.3 外部气相沉积法	155
6.2.1 SPM 啁啾效应	119	7.1.4 拉丝工艺	156
6.2.2 高斯脉冲的 SPM 谱展宽效应	121	7.2 光缆	157
6.2.3 色散的影响	123	7.2.1 光缆的基本技术要求	157
6.3 交叉相位调制	125	7.2.2 光缆的基本结构	157
6.3.1 两不同频率光信号间的 XPM 耦合传输方程	125	7.2.3 光缆的主要类型	158
6.3.2 光纤的非线性双折射	128	7.3 光纤损耗	160
6.3.3 同向准连续波之间的 XPM 效应	129	7.3.1 概述	160
6.3.4 反向传输准连续波之间的 XPM 效应	130	7.3.2 石英材料的本征吸收损耗	161
6.4 四波混频	130	7.3.3 杂质吸收损耗	162
6.4.1 光纤中的四波混频效应	130	7.3.4 瑞利散射损耗	162
6.4.2 FWM 耦合传输方程	132	7.3.5 弯曲损耗	163
6.4.3 泵浦 - 信号相互作用机制	133	7.3.6 改善光纤损耗特性的技术方向	163
6.4.4 FWM 光学相位共轭与光谱反转	134	7.4 光纤的主要类型与技术规范	164
6.4.5 色散对光纤中 FWM 效应的影响	135	7.4.1 多模光纤的主要类型与技术规范	164
6.5 受激非弹性散射	136	7.4.2 单模光纤的主要类型与技术规范	165
6.5.1 光纤中的受激非弹性散射过程	136	7.5 特种光纤及其制造	168
6.5.2 受激拉曼散射	137	7.5.1 稀土掺杂光纤	168
6.5.3 受激布里渊散射	140	7.5.2 光子晶体光纤	170
6.6 光纤中的光学孤立子	142	7.5.3 偏振保持光纤	172
		7.5.4 塑料光纤	172
		习题	173

第二篇 光通信器件技术基础

第8章 基本光纤器件	177	本结构	206
8.1 分波/合波器件	177	9.4.2 MZ滤波器的传输矩阵法 分析	207
8.1.1 分波/合波器件基本类型及 功能	177	9.5 光纤光栅	208
8.1.2 器件参数	178	9.5.1 光纤光栅基本结构和类型	208
8.2 耦合波导理论	180	9.5.2 光栅区域的光场耦合方程	209
8.2.1 耦合波导的基本结构与分析 方法	180	9.5.3 光纤光栅的传输矩阵分析 方法	212
8.2.2 耦合波方程	181	9.5.4 啁啾与切趾技术	214
8.2.3 耦合波方程的标准形式及其解	182	9.5.5 取样光栅	216
8.2.4 耦合波导结构光学特性的矩 阵表示	183	习题	220
8.2.5 关于耦合波导的重要结论	183	第10章 光纤放大器	223
8.3 熔烧拉锥型光纤耦合器技术	184	10.1 光放大器的发展历程	223
8.4 光纤接续技术与光纤连接器	185	10.1.1 早期的探索	223
8.4.1 光纤熔接技术	186	10.1.2 掺铒光纤放大器技术的发展	224
8.4.2 光纤活动连接器	187	10.1.3 光纤拉曼放大技术的发展	225
8.4.3 光纤连接损耗	188	10.1.4 其他光放大技术	225
8.5 光隔离器、环形器和衰减器	190	10.2 辐射跃迁过程的物理基础	225
8.5.1 光隔离器	190	10.2.1 基本相互作用过程	225
8.5.2 光纤环形器	192	10.2.2 自发辐射	226
8.5.3 光衰减器	194	10.2.3 受激辐射	226
习题	194	10.2.4 受激吸收	227
第9章 光学滤波器	198	10.2.5 模式增益和粒子数反转 条件	227
9.1 Fabry - Péro 滤波器	198	10.2.6 光子态密度与黑体辐射 定律	228
9.1.1 Fabry - Péro(FP)滤波器的 基本结构	198	10.2.7 Einstein 关系	229
9.1.2 FP滤波器的光学特性	198	10.2.8 自发辐射过程的本质	230
9.1.3 FP滤波器的性能参数	199	10.2.9 能级的自然宽度与线型 函数	230
9.2 介质膜滤波器	200	10.3 掺铒光纤放大器	231
9.2.1 介质膜滤波器基本组成	200	10.3.1 掺铒光纤放大器的基本 原理	231
9.2.2 单层介质膜的光学特性	201	10.3.2 EDFA的基本组成	233
9.2.3 多层膜技术	202	10.3.3 EDFA的行波速率方程 理论	234
9.3 HiBi 光纤 Sagnac 环滤波器	204	10.3.4 EDFA的增益饱和特性	237
9.3.1 滤波器基本结构	204	10.4 EDFA的动态模型与数值 化方法	239
9.3.2 HiBi 光纤 Sagnac 滤波器的 传输矩阵法分析	204	10.4.1 动态情形	239
9.4 Mach - Zender 型滤波器	206		
9.4.1 Mach - Zender 型滤波器的基			

10.4.2 数值化方法	239	11.2.6 FP 激光器的调制特性	278
10.5 放大器噪声	241	11.2.7 FP 激光器的光谱特性	279
10.5.1 EDFA 的噪声特性	241	11.3 动态单纵模激光器	281
10.5.2 粒子数反转因子与噪声	242	11.3.1 概述	281
10.5.3 EDFA 的级联	243	11.3.2 Bragg 光栅	281
10.6 光纤 Raman 放大器	245	11.3.3 DBR 激光器	283
10.6.1 受激与自发 Raman 散射 过程	245	11.3.4 DFB 激光器	285
10.6.2 FRA 的基本理论模型	246	11.3.5 VCSEL	286
10.6.3 动态情形	247	11.3.6 SG-DBR 激光器	287
10.6.4 光纤的 Raman 增益系数	248	11.4 发光二极管	288
10.6.5 FRA 的基本实施方式与 开关增益	249	11.4.1 概述	288
10.6.6 多泵浦宽带 Raman 放大 技术	250	11.4.2 面发射 LED	289
10.7 FRA 的噪声特性	251	11.4.3 边发射 LED	290
10.7.1 ASE 噪声	251	11.4.4 LED 的峰值波长与光谱 宽度	290
10.7.2 FRA 的多径干涉噪声	252	11.4.5 LED 的光-电流特性	292
10.7.3 FRA 的四波混频噪声	253	11.5 半导体光放大器	293
10.7.4 FRA 的其他噪声来源	254	11.5.1 SOA 的基本结构和技术 要求	293
10.7.5 新型 Raman 泵浦技术案例	255	11.5.2 SOA 的理论模型	294
习题	256	11.5.3 稳态光增益特性	295
第 11 章 半导体光电子器件	258	11.5.4 增益饱和	296
11.1 半导体的光电子学特性	258	11.5.5 SOA 的噪声特性	297
11.1.1 半导体的能带结构	258	11.5.6 SOA 的非线性特性及其 应用	298
11.1.2 主要的半导体材料及其掺杂	259	11.5.7 增益钳制技术	301
11.1.3 半导体内的光学过程	260	11.5.8 SOA 光开关	302
11.1.4 半导体的增益和吸收特性	262	11.6 半导体光电检测技术	302
11.1.5 PN 结及其光电子学特性	263	11.6.1 光电导效应	302
11.1.6 双异质结	265	11.6.2 PN 结光电二极管	303
11.1.7 异质结的外延生长技术	266	11.6.3 PIN 光电二极管	306
11.1.8 量子结构材料	267	11.6.4 雪崩光电二极管	308
11.1.9 简化的材料增益模型	269	11.7 光电检测噪声	313
11.1.10 自发复合与载流子寿命	270	11.7.1 散弹噪声过程	313
11.2 FP 型双异质结构激光器	271	11.7.2 散弹噪声过程的数字特征	315
11.2.1 FP 型激光器的基本结构	271	11.7.3 散弹噪声过程的功率谱 密度	317
11.2.2 FP 激光器的阈值特性与 纵模	272	11.7.4 暗电流和热噪声	318
11.2.3 FP 激光器的零维模型	274	11.7.5 光电检测过程的信噪比	320
11.2.4 FP 激光器的稳态特性	274	习题	324
11.2.5 弛豫过程与开关延迟	277		

第三篇 光纤通信系统和网络

第 12 章 光纤传输系统	333	13.3 同步数字体系	376
12.1 光纤传输系统的基本组成	333	13.3.1 SDH 的速率等级和帧结构	377
12.2 光发送机组件	334	13.3.2 SDH 的复用映射结构	378
12.2.1 码型转换	335	13.3.3 SDH 基本网络单元设备	380
12.2.2 调制/驱动电路	337	13.3.4 SDH 传输网	382
12.2.3 自动功率控制电路	338	13.4 异步传递模式	384
12.2.4 自动温度控制电路	339	13.4.1 ATM 信元结构	385
12.3 光接收机组件	340	13.4.2 ATM(B-ISDN) 协议参考模型	386
12.3.1 前端	341	13.4.3 ATM 交换	387
12.3.2 线性通道	343	13.5 互联网协议	388
12.3.3 数据恢复	345	13.5.1 TCP/IP 参考模型	389
12.4 光放大器噪声及其级联	346	13.5.2 互联网协议	390
12.4.1 光放大器的噪声特性	346	13.5.3 宽带 IP 网的传输技术	393
12.4.2 光放大器的级联	347	13.6 光纤通信网的管理、保护与恢复	394
12.5 色散调节技术	349	13.6.1 光纤通信网的管理	395
12.5.1 发送端的色散调节	349	13.6.2 光纤通信网的保护与恢复	396
12.5.2 传输段的色散调节	351	习题	400
12.5.3 接收端的色散调节	355	第 14 章 全光网技术及其发展	401
12.6 光纤传输系统设计	355	14.1 引言	401
12.6.1 系统单元参数的选择	355	14.2 通信网络的发展过程	402
12.6.2 损耗限制系统和光功率预算	356	14.2.1 电网络	402
12.6.3 色散限制系统及色散预算	357	14.2.2 光电混合网络	402
12.6.4 带宽设计	359	14.2.3 全光网络	403
12.7 光纤传输系统性能评估	359	14.3 全光网络中的传输技术	403
12.7.1 系统参考模型	360	14.3.1 WDM 全光通信网络	404
12.7.2 误码性能	361	14.3.2 OTDM 全光通信网络	405
12.7.3 抖动性能	362	14.3.3 OCDMA 全光通信网络	408
12.7.4 光接口技术要求	363	14.3.4 分组交换全光通信网络	409
习题	364	14.4 无源光网络	413
第 13 章 光纤通信网	366	14.4.1 GPON	414
13.1 通信网的拓扑结构与分类	366	14.4.2 EPON	419
13.1.1 通信网的拓扑结构	367	14.4.3 WDM-PON	422
13.1.2 通信网的分类	368	14.5 光传送网	425
13.2 准同步数字体系	371	14.5.1 G.709 OTN 信息结构	427
13.2.1 PDH 的不同系列	372	14.5.2 OTN 的优点	430
13.2.2 时分复用和 PCM30/32 路系统	372	14.6 自动交换光网络	433
13.2.3 PDH 高次群的时分复用	374	14.6.1 ASON 技术的发展	433
13.2.4 PDH 系统	376	14.6.2 ASON 的分层体系结构	435
		14.6.3 ASON 的技术优势	440

14.7 全光网的网络管理	440	14.8 全光网络的安全问题	445
14.7.1 概述	440	14.8.1 全光网络的安全特征	445
14.7.2 全光网络的管理需求	441	14.8.2 攻击类型	446
14.7.3 全光网络的管理功能和 方式	442	14.8.3 全光网络攻击方法	446
14.7.4 管理通道的实现	443	14.8.4 全光网络的安全措施	448
		习题	449

第四篇 光纤与光纤通信系统测量

第15章 光纤测量技术	453	15.7 光时域反射计	469
15.1 光功率计	453	15.7.1 光时域反射计的功能	469
15.2 光纤几何参数的测量	454	15.7.2 OTDR 的测试步骤	469
15.2.1 光纤预制棒的测试	454	15.7.3 OTDR 测试实例及结果判读	469
15.2.2 折射近场法	455	习题	470
15.2.3 近场扫描法	456	第16章 光纤通信系统性能的测量 与监控	472
15.2.4 反射法	457	16.1 光接收机灵敏度和动态范围 的测量	472
15.2.5 光纤数值孔径的测量	458	16.1.1 光接收机灵敏度的测量	472
15.3 光纤衰减测量	458	16.1.2 光接收机动态范围的测量	473
15.3.1 概述	458	16.2 光纤通信系统误码率和 功率代价的测量	474
15.3.2 截断法	459	16.2.1 误码率测量	474
15.3.3 插入损耗法	460	16.2.2 功率代价测量	475
15.3.4 背向散射法	461	16.3 眼图及其测量	477
15.4 光纤色散的测量	461	16.4 光谱分析仪	479
15.4.1 模间色散	462	16.5 光纤通信系统的在线监测 技术	480
15.4.2 模间色散的时域测量	462	16.5.1 概述	480
15.4.3 模间色散的频域测量	463	16.5.2 光纤通信质量监测系统 的基本技术要求	481
15.4.4 色度色散的测量	463	16.5.3 传输损耗的在线监测技术	482
15.5 光纤偏振特性的测量	465	习题	482
15.5.1 光纤拍长的测量	465		
15.5.2 光纤偏振模色散的测量	466		
15.6 光纤的机械特性和强度测试	467		
15.6.1 概述	467		
15.6.2 光纤的强度衰弱和断裂	468		
15.6.3 测量方法	468		

附 录

附录1 矢量分析和场论	485	附1.1.5 参量微积分	487
附1.1 矢量的基本运算法则	485	附1.1.6 重要公式	487
附1.1.1 矢量的加法	485	附1.2 矢量场和标量场	487
附1.1.2 矢量的点积(标量积)	485	附1.2.1 空间位矢、标量场和 矢量场	487
附1.1.3 矢量的叉积(矢量积)	486	附1.2.2 Hamilton 矢量算子	487
附1.1.4 并矢(张量积)	486	附1.2.3 标量场的梯度	488

VIII 目 录

附 1.2.4 矢量场的散度	488	附 2.2 Bessel 函数的性质	495
附 1.2.5 矢量场的旋度	489	附 2.2.1 递推关系和微分公式	495
附 1.2.6 Helmholtz 定理	489	附 2.2.2 $J_m(x)$ 和 $N_m(x)$ 的函数 曲线	495
附 1.2.7 重要公式	490	附 2.2.3 小宗量近似	496
附 1.3 三维正交曲线坐标系	490	附 2.2.4 大宗量近似	496
附 1.3.1 线度元、面积元和体积元	490	附 2.2.5 Bessel 函数的零点公式	497
附 1.3.2 梯度、散度和旋度	490	附 2.3 整数阶的变形 Bessel 方程及 其解	497
附 1.3.3 Laplacian 算子	491	附 2.3.1 变形 Bessel 方程	497
附 1.3.4 直角坐标系	491	附 2.3.2 第一类和第二类的变形 Bessel 函数	497
附 1.3.5 柱坐标系	491	附 2.4 变形 Bessel 函数的性质	498
附 1.3.6 球坐标系	492	附 2.4.1 递推关系和微分公式	498
附录 2 Bessel 函数	494	附 2.4.2 $I_m(x)$ 和 $K_m(x)$ 的函数 曲线	498
附 2.1 整数阶 Bessel 方程及其解	494	附 2.4.3 小宗量近似	498
附 2.1.1 Bessel 方程	494	附 2.4.4 大宗量近似	499
附 2.1.2 Bessel 函数和 Neumann 函数	494		
附 2.1.3 第一类和第二类的 Hankel 函数	495		
参考文献	500		

第一篇 光纤技术基础

第 1 章

引 论^[1~12]

广义而言,通信是指异地间的信息传送与交换,是人类社会生活和生产活动的一个重要方面。光通信就是用光进行信息传送的通信方式。光通信的历史可以追溯到远古时代,是人类最古老的通信方式之一。在古代,人们常常用火光或烟雾进行一条简单信息的传送,如敌人入侵或战斗结束等。后来,人们学会了以事先约定的规则(编码)用信号灯、旗语等进行较为复杂的信息传递活动。同时,通过采用接力(中继)的方式可以将这些信息传送到很远的地方。直到 19 世纪初,这种简单的光通信系统一直是人类的主要通信方式之一,甚至在今天的某些特殊场合仍然被沿用。然而,从现代通信技术的角度来看,其通信速率之低令人难以置信,通常小于每秒一个比特(1b/s)。

进入 19 世纪以后,随着电报和电话技术的发明,电通信技术得到了迅速的发展,并极大地推动了人类文明和电子信息技术的进步。到 20 世纪 70 年代,以同轴电缆和微波技术为基础的通信系统的信息传输速率达到了 100Mb/s 的水平。此后,随着激光和光纤技术的出现,光纤通信技术由于具有可大幅度提高系统的信息传输速率,同时系统的能量消耗以及其建设、运行和维护成本也可成倍降低等许多其他通信方式无可比拟的优点,因而成为通信技术发展的最主要方向之一。其技术更新和信息传输速率提升的速度之快达到了令人难以置信的程度。目前,单根光纤已经具备 10Tb/s 的信息传送能力,同时在各种新的光纤材料技术、对高速信号进行全光信息处理的有关器件与技术、网络全光化以及直接向最终用户提供超宽带宽光纤接入等众多光纤通信技术的核心领域的研究和开发工作尚处在方兴未艾的紧张进行阶段,具有极其广阔的科学研究和商业发展前景。

本章在简要回顾电通信技术发展历史的基础上,论述用光载波进行信息传送的必要性以及构建光通信系统所需要解决的若干基本技术问题及其解决途径。最后对光纤通信技术的几个具有里程碑意义的主要发展阶段及其所依赖的相关技术突破进行阐述,并对光纤通信技术未来的发展趋向和发展前景进行展望。本章旨在对光纤通信技术的历史、现状和未来作一个较为全面的概括,使读者了解从光纤技术、光电子器件技术到光网络技术的光纤通信技术的全貌。在开阔视野的同时,提高在后续内容学习过程中的针对性。

1.1 电 通 信 技 术 的 发 展

19 世纪 30 年代,随着莫尔斯发明电报,人类迎来了电通信时代。电报采用两种不同长度的

[1~12]:参阅本书后参考文献的[1]~[12]。