

高等院校信息与通信工程系列教材

光纤通信与光纤信息网

董天临 主编

清华大学出版社

高等院校信息与通信工程系列教材

光纤通信与光纤信息网

董天临 主编

清华大学出版社
北京

内 容 简 介

光纤通信是一门发展非常迅速的新兴学科。本书针对光纤通信近年在密集波分复用方面的新进展,突出了与之相关的原理和技术;在讨论光纤网时为适应更广泛的读者,以光纤信息网为主要内容,更符合 IP 和 Internet 迅猛发展并取得压倒优势的趋势;本书还基于编者研制开发的光纤通信教学实验系统,介绍了光纤通信教学实验,以便于原理教学和实验教学密切结合。

全书共有 16 章及实验指导书,内容丰富,结构合理。本书可作为电子信息工程和通信工程及其他有关专业的本科生教材,也可供研究生、工程技术人员、科研人员和管理人员学习、研究光纤通信和光纤信息网参考。

版权所有,翻印必究。举报电话:010-62782989 13501256678 13801310933

图书在版编目(CIP)数据

光纤通信与光纤信息网/董天临主编. —北京:清华大学出版社,2005.9

(高等院校信息与通信工程系列教材)

ISBN 7-302-11106-5

I. 光… II. 董… III. ①光纤通信—高等学校—教材②光纤通信—通信网—高等学校—教材
IV. TN929.11

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 054262 号

出版者:清华大学出版社 地 址:北京清华大学学研大厦
<http://www.tup.com.cn> 邮 编:100084
社 总 机:010-62770175 客 户 服 务:010-62776969

责任编辑:陈国新

印 刷 者:北京国马印刷厂

装 订 者:三河市化甲屯小学装订二厂

发 行 者:新华书店总店北京发行所

开 本:185×260 印张:23 字数:557千字

版 次:2005年9月第1版 2005年9月第1次印刷

书 号:ISBN 7-302-11106-5/TN·256

印 数:1~3000

定 价:32.00元

高等院校信息与通信工程系列教材编委会

主 编：陈俊亮

副 主 编：李乐民 张乃通 邬江兴

编 委(排名不分先后)：

王 京 韦 岗 朱近康 朱世华

邬江兴 李乐民 李建东 张乃通

张中兆 张思东 严国萍 刘兴钊

陈俊亮 郑宝玉 范平志 孟洛明

袁东风 程时昕 雷维礼 谢希仁

责任编辑：陈国新

出版说明

信息与通信工程学科是信息科学与技术的重要组成部分。改革开放以来,我国在发展通信系统与信息系统方面取得了长足的进步,形成了巨大的产业与市场,如我国的电话网络规模已占世界首位,同时该领域的一些分支学科出现了为国际认可的技术创新,得到了迅猛的发展。为满足国家对高层次人才的迫切需求,当前国内大量高等学校设有信息与通信工程学科的院系或专业,培养大量的本科生与研究生。为适应学科知识不断更新的发展态势,他们迫切需要内容新颖又符合教改要求的教材和教学参考书。此外,大量的科研人员与工程技术人员也迫切需要学习、了解、掌握信息与通信工程学科领域的基础理论与较为系统的前沿专业知识。为了满足这些读者对高质量图书的渴求,清华大学出版社组织国内信息与通信工程国家级重点学科的教学与科研骨干以及本领域的一些知名学者、学术带头人编写了这套高等院校信息与通信工程系列教材。

该套教材以本科电子信息工程、通信工程专业的专业必修课程教材为主,同时包含一些反映学科发展前沿的本科选修课程教材和研究生教学用书。为了保证教材的出版质量,清华大学出版社不仅约请国内一流专家参与了丛书的选题规划,而且每本书在出版前都组织全国重点高校的骨干教师对作者的编写大纲和书稿进行了认真审核。

祝愿《高等院校信息与通信工程系列教材》为我国培养与造就信息与通信工程领域的高素质科技人才,推动信息科学的发展与进步做出贡献。

北京邮电大学
陈俊亮

前 言

信息是现代生活和未来社会的基本要素。长期以来,信息的产生、传播和处理主要是在电子学领域进行的。但光纤通信和光电子学等方面的技术进步,已经使得信息科学的发展进入了一个崭新的电子学和光子学相结合的领域,并且光信息技术正在占有越来越大的比重。

光纤通信作为最具有代表性的技术,不仅从深度和广度两方面促进了通信学科与许多相关学科的互相影响和渗透,而且与数理、材料等基础学科交叉,形成了许多前沿研究领域。更重要的是,光纤通信已经形成产业,不仅包括最初的光纤光缆、光源和光检测器、光发送和接收端机的设计、工艺和制造,而且还包括高速调制、光复用、光变频、光放大和光网络等各种十分复杂的领域;不仅与国民经济,而且与人们的日常生活息息相关。光纤通信的原理和技术在其他领域也有非常广泛的应用。自然,对于光纤通信方面的人才的强烈需求也是不言而喻的。本书讲述光纤通信和光纤信息网,以期读者成为这一新兴科技产业领域中积极的活跃的一员。

值得注意的是,随着近年来在光放大和密集波分复用方面的新进展,光纤的应用,已经由点对点的连接向着点对多点和任意点对任意点(IP 和 Internet)的连接延伸,由此形成光纤通信网。在光纤网的研究和应用中,不仅是要注重速率和传输距离,更要注重的是可以支持多少不同光波长的数据流,可以获得多大带宽的光放大,能够以多大速率进行可调谐接收或发送的频道转换,以及如何用光的方式实现网络的互联,如何使网络协议支持更大的连接速率,如何最有效地向用户提供更多资源等与多节点网络相关的问题。这就大大扩展了光纤通信的知识范围和应用领域。或许可以说,不用多少年,人们不懂“光”就像现在人们不懂“电”一样会遇到种种困难。

我们从 1988 年起先后相继为本科生和研究生开设了光纤通信课程。从教学中感到,最大限度地满足不同读者的需求,使他们不仅在目前,而且在以后的工作中能够跟上光纤通信迅猛的发展并做出自己的贡献和创造,应当在教学中占有重要的地位。为此,我们编写本书时,对容易从其他方面获得的光纤通信技术的早期内容和即将被取代的复杂技术,做了大幅度的精简,以便用有限的篇幅和较少的学时加强学科基础,有效引导读者进入学科前沿。同时,鉴于许多读者学习本课程时对光纤通信和光纤信息网缺乏最起码的实际知识,增加了光纤通信教学实验方面的内容。

由于编者理论水平和实践程度有限,这些尝试是否能达到预期效果,还需本书使用者提出宝贵意见。

本书由田加胜编写第 2 章至第 9 章;陈萍编写第 10 章至第 14 章;董天临编写其余

部分,并担任主编工作。

占腊民博士和贾玉福、钱小虎、李守勇、唐珏、张伽、代勇、答嘉曦、刘丽华、杨卓、夏达、单磊、刘慧侃等研究生为本书的编写提供了很多帮助,特此表示感谢。

编 者

2005年4月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 光纤通信的发展	1
1.2 光纤通信的优势	5
1.3 光纤及其制造工艺简介	8
1.4 系统组成	8
1.5 本书内容安排	9
第 2 章 介质光波导	10
2.1 介质平板光波导.....	10
2.1.1 几何光学分析	10
2.1.2 波动理论	16
2.2 介质圆柱光波导.....	21
2.2.1 射线分析	22
2.2.2 光纤的波动理论	26
第 3 章 光纤的传输特性	36
3.1 光纤的损耗.....	36
3.1.1 吸收损耗	37
3.1.2 散射损耗	38
3.1.3 其他损耗	39
3.2 光纤的色散特性.....	39
3.2.1 色散概述	39
3.2.2 材料色散	40
3.2.3 波导色散	41
3.2.4 模式色散	43
3.3 光纤的非线性特性.....	44
3.3.1 光纤的非线性效应	44
3.3.2 非线性折射	45
3.3.3 四波混频(FWM).....	47
3.3.4 受激喇曼散射	48

3.3.5	受激布里渊散射(SBS)	50
3.4	光纤的双折射现象	51
3.4.1	双折射的基本概念	51
3.4.2	光纤中双折射的种类	51
3.4.3	双折射对偏振状态的影响	52
3.5	光脉冲在光纤中的传播	53
3.5.1	基本传播方程	53
3.5.2	色散和脉冲展宽	54
3.5.3	光纤孤子	55
第4章	光路无源器件	57
4.1	光纤连接器	57
4.1.1	概述	57
4.1.2	光纤连接器的损耗及其原因	57
4.1.3	光纤连接器的构造	59
4.2	光纤定向耦合器	60
4.2.1	光纤定向耦合器的结构和工作原理	60
4.2.2	光纤式定向耦合器的主要参数	62
4.3	光衰减器	63
4.3.1	光衰减器的作用和原理	63
4.3.2	光衰减器的分类和基本结构	63
4.4	光隔离器	64
4.4.1	光隔离器的基本原理和结构	65
4.4.2	光隔离器的主要参数和指标	66
4.5	声光器件	67
第5章	光源和光发送机	69
5.1	半导体中的光电相互作用	69
5.1.1	光的辐射和吸收	69
5.1.2	P-N结及其光电特性	71
5.2	半导体激光器(LD)	72
5.2.1	LD的工作原理	72
5.2.2	LD的结构和工作特性	74
5.3	发光二极管(LED)	78
5.3.1	LED的工作原理	78
5.3.2	LED的工作特性	79
5.4	新型激光器	80
5.4.1	分布反馈(DFB)和分布布拉格反射(DBR)LD	80

5.4.2	耦合腔 LD	81
5.4.3	量子阱(QW)LD	82
5.4.4	光纤激光器	83
5.4.5	垂直腔面发射激光器(VCSEL)	86
5.5	光发送机	88
5.5.1	光源的调制方式	90
5.5.2	LD 的驱动与控制电路	92
5.5.3	LED 的驱动电路	95
第 6 章	光检测器与光接收机	98
6.1	光检测器	98
6.1.1	半导体的光电效应	98
6.1.2	PIN 光电二极管	99
6.1.3	雪崩光电二极管	100
6.1.4	光检测器的主要性能指标	101
6.1.5	新型光检测器简介	103
6.2	数字光接收机	105
6.2.1	光接收机的原理及组成	106
6.2.2	光接收机的噪声	111
6.2.3	光接收机的主要性能指标及分析	113
第 7 章	光放大器	117
7.1	特性、分类与应用方式	118
7.1.1	特性	118
7.1.2	分类	120
7.1.3	应用方式	121
7.2	半导体光放大器	121
7.2.1	工作原理	122
7.2.2	特性分析	123
7.2.3	性能与应用	124
7.3	EDFA	125
7.3.1	工作原理	126
7.3.2	特性分析	129
7.3.3	性能与应用	130
7.4	光纤喇曼放大器	132
7.4.1	工作原理	132
7.4.2	特性分析	133
7.4.3	性能与应用	135

7.5	其他光放大器	135
7.5.1	光纤布里渊放大器	135
7.5.2	掺铒波导光放大器	136
7.6	光放大器的性能比较与发展趋势	136
7.6.1	性能比较	136
7.6.2	发展趋势	138
第8章	光波分复用技术	139
8.1	WDM 技术概述	139
8.1.1	基本概念	139
8.1.2	DWDM	141
8.1.3	DWDM 的主要技术问题	141
8.2	DWDM 工作原理和系统组成	144
8.2.1	工作原理	144
8.2.2	基本类型	145
8.3	光源波长的稳定与控制	147
8.4	DWDM 复用器	148
8.4.1	熔锥光纤耦合型波分复用器	149
8.4.2	干涉滤波器型波分复用器	149
8.4.3	光栅型波分复用器	150
8.4.4	集成光波导波分复用器	152
8.5	光波长转换器(OTU)	152
8.5.1	光电—电光型 OTU	153
8.5.2	基于半导体光放大器交叉增益调制特性的 OTU	153
8.5.3	基于半导体光放大器中交叉相位调制的 OTU	154
8.6	DWDM 串扰问题	154
8.6.1	非线性串扰	155
8.6.2	线性串扰	156
第9章	光纤通信系统	157
9.1	光纤通信系统的组成	157
9.1.1	概述	157
9.1.2	线路调制码型和线路传输码型	158
9.1.3	光纤通信系统的中继方式	162
9.1.4	光纤通信系统的辅助系统	164
9.2	光纤通信系统的性能指标	165
9.2.1	光纤通信系统的误码率	165
9.2.2	光纤通信系统的抖动	166

9.2.3	光纤通信系统的可靠性	167
9.3	光纤通信系统指标的分析 and 计算	168
9.3.1	概述	168
9.3.2	光纤通信系统的损耗计算	168
9.3.3	光纤通信系统的色散计算	169
9.4	光纤通信系统的系统噪声	169
第 10 章	光纤信息网概述	172
10.1	光纤信息网	172
10.1.1	通信网与光纤信息网	172
10.1.2	多波长光纤网络	173
10.1.3	信息的透明性	175
10.2	分层结构	176
10.3	中间节点	177
10.3.1	NAS	177
10.3.2	ONN	180
10.4	WDM 网络分类	181
10.4.1	广播选择网	182
10.4.2	波长选路网	183
10.5	拓扑结构	185
10.5.1	物理拓扑	186
10.5.2	逻辑拓扑	187
第 11 章	网络节点设备	189
11.1	波长变换器	189
11.1.1	原理	189
11.1.2	分类	190
11.1.3	应用	193
11.2	光分插复用器	194
11.2.1	性能参数	194
11.2.2	结构组成	195
11.2.3	发展趋势	197
11.3	光交叉连接器	198
11.3.1	主要功能	199
11.3.2	性能指标	200
11.3.3	结构分析与设计	201
11.3.4	结构的比较与讨论	205
11.4	IP 路由器	206

第 12 章 光纤以太网	210
12.1 光纤局域网概述	210
12.1.1 光纤局域网发展简史	211
12.1.2 光纤局域网标准体系	212
12.2 以太网的重要概念和标准	213
12.2.1 以太网的系统结构	214
12.2.2 CSMA/CD 光纤网物理层	214
12.2.3 以太网的帧结构	215
12.2.4 CSMA/CD 总线型光纤网中的碰撞检测	216
12.3 器件损耗限制的估算	217
12.3.1 无源光纤总线和环状拓扑	217
12.3.2 无源星状拓扑	219
12.4 千兆以太网	220
12.4.1 协议结构及标准	221
12.4.2 MAC 子层	222
12.4.3 介质无关接口	223
12.4.4 物理层	223
12.4.5 对物理介质的有关要求	225
12.4.6 链路功率预算	229
12.4.7 网络设备	229
第 13 章 路由和波长分配	231
13.1 基本概念	231
13.1.1 通道类型	232
13.1.2 流量类型	233
13.1.3 网络类型	233
13.1.4 保护类型	234
13.2 波长路由网络的 RWA 问题	236
13.2.1 静态流量操作	236
13.2.2 动态流量操作	238
13.2.3 ADMH 算法	240
13.3 逻辑路由网络的 RWA 问题	241
13.3.1 物理拓扑和逻辑拓扑	241
13.3.2 逻辑拓扑优化问题	243
13.3.3 优化算法分析	244

第 14 章 IP over WDM 光信息网	246
14.1 IP 业务对光网络的要求	246
14.2 IP over WDM 的演进	248
14.3 IP over DWDM 结构	250
14.4 主要技术问题	253
14.4.1 协议与帧格式	254
14.4.2 保护和恢复	256
14.4.3 组网与路由	257
14.4.4 控制、管理与 QoS	260
14.4.5 标准化	262
14.5 国内 IP over DWDM 试验	263
14.6 其他 DWDM 方案	264
14.6.1 MPLS over DWDM 技术	264
14.6.2 Packet over DWDM 技术	265
14.6.3 基于 LOBS 的 IP over DWDM 技术	266
第 15 章 光纤通信和光信息网技术趋势	268
15.1 高速传输	269
15.1.1 WDM	269
15.1.2 混合传输	270
15.1.3 其他	270
15.2 综合型节点	272
15.3 智能联网	273
15.4 光节点技术	275
15.4.1 光子交换	276
15.4.2 新型元器件	277
第 16 章 光纤通信教学实验装置和实验方法	282
16.1 引言	282
16.2 实验平台	283
16.2.1 基本体制	283
16.2.2 工作原理	285
16.2.3 系统组成及其工作方式	295
16.3 测试平台	309
16.3.1 虚拟仪器	309
16.3.2 基于声卡的虚拟仪器	310
16.4 特殊测量方法和实验技术	312

16.4.1	任意变化信号的测量和数据显示	312
16.4.2	扫描测量光源 P-I 特性	313
16.4.3	替代法测量光纤损耗	314
16.4.4	光纤色散特性的观测	315
16.4.5	光功率测量	317
16.4.6	多媒体通信	318
附录 实验指导书		322
1.	光纤通信教学实验系统简介	322
2.	实验装置仪器	323
3.	实验内容	323
实验 1	光发送、光接收器件、光纤、光纤连接器	323
实验 2	音频虚拟数字存储示波器和虚拟信号发生器	325
实验 3	微处理器和信号发生电路	330
实验 4	光发送电路实验	331
实验 5	光接收电路实验	331
实验 6	P-I 特性测试	332
实验 7	模拟信号(方波、脉冲波、三角波、正弦波)传输	336
实验 8	扫频信号传输实验	336
实验 9	消光比测试	337
实验 10	衰减现象的观测	337
实验 11	CMI, Manchester, 1B1H 和 PN 码型变换和数据收发(单机实验)	337
实验 12	色散现象的观测	338
实验 13	双工数据通信和区间通信实验(双机实验)	338
实验 14	网络通信	339
实验 15	光纤 IP 电话	344
实验 16	光纤数字视频	346
实验设计 1	光功率计	349
实验设计 2	光示波器	349
实验设计 3	光纤电话	349
4.	实验报告	349
参考文献		350

第 1 章 绪 论

信息的产生、传播和处理是现代生活和未来社会的一项最基本的活动。长期以来,这些活动主要是在电子学领域进行的,但导波光学和光电子技术的进步已经使得这种情况完全改观,信息科学的发展进入了一个崭新的电子学和光学相结合领域,而且光信息技术显得越来越重要。这方面具有代表性的技术包括光纤通信、光纤传感、光盘存储和显示及光信息处理等。光通信技术是世界新技术革命的重要标志,已经成为信息社会中传输各种信息的主要工具。这种新兴技术,作为信息技术的重要支撑平台,在信息社会中将起到十分重要的作用。

光纤通信不仅从深度和广度两方面促进了通信学科与许多相关学科的互相影响和渗透,而且与数理材料等基础学科交叉形成许多前沿研究领域。更重要的是,光纤通信已经形成产业,不仅与国民经济,而且与人们的日常生活息息相关。不管从哪个角度看,都可以说光技术对本世纪来说,就像电技术对上一世纪那样重要。本书的目的是讲述光纤通信和光纤信息网的原理和技术,以期读者成为这一新兴科技产业领域中积极的活跃的一员。

1.1 光纤通信的发展

光通信的历史往往会追溯到我国约 3 000 年前的烽火台,古埃及也出现过烽烟台。到 17 世纪中叶,人们用望远镜来观察用不同颜色的烟表示的各种信息。1791 年法国 Chappe 发明了信号灯,此后欧洲、北非利用“灯语”的通信于 1844 年达到鼎盛。现还在使用的交通信号灯和船舶用的“旗语”,仍保留着这些古老通信方式的特点。但严格说上述种种通信方式都不能算是真正的光通信。

即便是 1880 年贝尔发明的“光电话”,也和我们今天所指的光通信有很大的不同。这种光电话利用太阳光或弧光灯作为光源,通过透镜把光束聚焦在送话器前的振动镜片上,使光强度随话音的变化而变化,实现话音对光强度的调制。在接收端,用抛物面反射镜把从大气传来的光束反射到硅光电池上,使光信号变换为电流,传送到受话器。由于当时没有理想的光源和传输介质,这种光电话的传输距离很短,并没有实际应用价值。然而,光电话仍是一项伟大的发明,它证明了用光波作为载波传送信息的可行性。因此,可以说贝尔光电话是现代光通信的雏形。

1960 年,美国人梅曼(Maiman)发明了第一台红宝石激光器,给光通信带来了新的希望。和普通光相比,激光具有波谱宽度窄,方向性极好,亮度极高,以及频率和相位较一致的良好特性。激光器的发明和使用,使光通信的发展进入一个崭新的阶段。

在这个时期,美国麻省理工学院利用 He-Ne 激光器和二氧化碳激光器进行了大气激

光通信试验。实验证明：承载信息的光波通过大气的传播，可以实现点对点的通信，虽然这种方式无须敷设线路，经济方便，但是它受大气影响极大，不能全天候工作。

早在1910年，Debye等人就开始了介质波导的理论研究，到1920年进行了介质波导的实验。1951年就出现了传光用的玻璃纤维，但当时的玻璃纤维仅用于一些医疗设备（如胃镜）或光学机械中，并不能用于通信，因为它的传输损耗太大了，即使是用最好的光学玻璃制成的纤维，其损耗也在1000 dB/km左右。因此，没有人在当时利用它作为光通信的传输介质。相反，却有不少人在1962年到1964年进行透镜阵列波导、气体透镜波导等的研究，以期用这些来代替大气传输方式。由于系统复杂、昂贵，调试维护困难而不得不放弃。

由于缺乏稳定可靠和低损耗的传输介质，光通信的研究一度几乎停顿。

一般认为光纤通信的发展只有几十年的历史。1966年，被称为“光通信之父”的英籍华人高锟(C. K. Kao)博士等，根据介质波导理论，提出光纤通信的概念。他预见到，只要设法消除玻璃中的各种杂质，做出有实用价值的低损耗光纤是完全可能的，并指出光纤的损耗为20 dB/km的要求还远大于材料的机理所确定的损耗极限。然而当时绝大多数人认为这不可能，只有少数机构有远见卓识的领导和科学家进行了研究工作。直到1970年，美国康宁公司的Maurer等人首先研制出损耗为20 dB/km的光纤，并在1972年又把光纤的损耗降到4 dB/km，此时，各国都开始重视了光纤通信这一新的通信方式，继而使光纤通信的研究有了飞速的发展。

就在光纤有了重大突破的同一年，美国贝尔实验室研制成功室温下连续振荡的半导体(GaAlAs)激光器，为光纤通信找到了合适的光源。初期的半导体激光器寿命很短，但此后通过各国不懈的努力，各种类型的可实用的激光器相继被研制出来，为光纤通信的商用化奠定了基础。

1973年贝尔实验室发明的MCVD(改进的化学气相沉积法)制造光纤，使光纤损耗下降到1 dB/km以下，1974年日本解决了光纤的现场敷设及接续问题。1975年出现了光纤活动连接器。1976年日本NTT和富士通把光纤损耗降到0.5 dB/km(1.2 μm)。这一年，美国首先在亚特兰大成功地进行了44.736 Mb/s传输10 km的光纤通信系统现场试验，使光纤通信向实用化迈出了第一步。

1977年美国在芝加哥进行了44.736 Mb/s现场试验。1978年日本开始了32.064 Mb/s和92.728 Mb/s的光纤通信系统现场试验。1979年AT & T和日本NTT均研制出1.55 μm 半导体激光器(LD)，日本也做出了超低损耗的光纤(0.2 dB/km, 1.55 μm)，同时进行了多模光纤1.3 μm 长波长系统的现场试验。

到1980年，多模光纤通信系统已经投入了商用，单模光纤通信系统也进入了现场试验。1983年日本兴建了一条从北海道到冲绳纵贯南北的光缆干线，全长3400 km，采用24芯单模光缆，400 Mb/s系统。美国也在东、西海岸各敷设了一条光缆干线，长度分别为600 km和270 km，芯数为144芯。接着又在1985年敷设了2000 km长的南北干线，而且继之又建设了总长 5×10^4 km的光缆，把22个州用光缆连了起来，且绝大多数是400 Mb/s系统。到20世纪90年代初，1.7 Gb/s系统已投入商用，并在发展2.4 Gb/s系统。英国的光缆通信线路已超过20000 km，大多是单模140 Mb/s和565 Mb/s系统；