

21

世纪
信息与通信技术教程

光纤通信

——通信用光纤、器件和系统

- 美国光学学会
- [美] Michael bass 主编
- 胡先志 胡佳妮 杜娟 等译

Mc
Graw
Hill

0.11

 人民邮电出版社
POSTS & TELECOM PRESS

21 世纪信息与通信技术教程

光纤通信

——通信用光纤、器件和系统

美国光学学会

[美] Michael bass 主编

胡先志 胡佳妮 杜娟 等译

人民邮电出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

光纤通信: 通信用光纤、器件和系统/ (美) 巴斯 (Bass, M.) 主编; 胡先志, 胡佳妮, 杜娟等译.—北京: 人民邮电出版社, 2004.7

21 世纪信息与通信技术教程

ISBN 7-115-12300-4

I. 光... II. ①巴... ②胡... ③胡... ④杜... III. 光纤通信—教材 IV. TN929.11

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 049649 号

内 容 提 要

本书是由美国光学学会组织的 18 名世界著名的光纤通信专家集体编写的一本介绍通信用光纤、器件和系统的最新研究成果的专著。书中全面地介绍了光纤通信技术领域中所涉及到的各个分支, 如光纤、光纤通信技术、光纤非线性效应、光纤通信用光源、调制器和探测器、光纤放大器、光纤通信线路、光纤通信系统中的光孤子、耦合器、合(分)波器、光纤布拉格光栅、组网微光器件、半导体光放大器、光时分复用通信网、光波分复用(WDM)光纤通信网、光纤通信标准等具体技术内容。

本书内容翔实、技术新颖, 既有理论分析计算, 又有大量应用实例。由于本书的作者都是光纤通信领域国际知名的专家, 所以本书是一本既充分展现作者各自研究专长, 又凝聚作者集体智慧的高水平的技术专著。它可供从事光纤生产和工程应用以及从事光纤通信研究的技术人员使用, 也可作为高等院校光纤通信技术及相关专业师生的教学参考书。

21 世纪信息与通信技术教程

光纤通信——通信用光纤、器件和系统

◆ 主 编 [美] Michael bass

译 胡先志 胡佳妮 杜娟 等

责任编辑 梁凝

◆ 人民邮电出版社出版发行·北京市崇文区夕照寺街 14 号

邮编 100061 电子函件 315@ptpress.com.cn

网址 <http://www.ptpress.com.cn>

读者热线 010-67129258

北京汉魂图文设计有限公司制作

内蒙古邮电印刷厂印刷

新华书店总店北京发行所经销

◆ 开本: 787×1092 1/16

印张: 21.75

字数: 516 千字

2004 年 7 月第 1 版

印数: 1-3 500 册

2004 年 7 月内蒙古第 1 次印刷

著作权合同登记 图字 01-2004-2125 号

ISBN 7-115-12300-4/TN · 2284

定价: 37.00 元

本书如有印装质量问题, 请与本社联系 电话: (010) 67129223

版 权 声 明

Michael Bass

Fiber Optics Handbook

ISBN:0-07-138623-8

Copyright©2002 by the McGraw-Hill Companies, Inc.

Original language published by The McGraw-Hill Companies, Inc. All Rights reserved. No part of this publication may be reproduced or distributed in any means, or stored in a database or retrieval system, without the prior written permission of the publisher.

Simplified Chinese translation edition jointly published by McGraw-Hill Education(Asia)Co. and Posts & Telecommunications Press.

本书中文简体字翻译版由人民邮电出版社和美国麦格劳-希尔教育(亚洲)出版公司合作出版。未经出版者预先书面许可,不得以任何方式复制或抄袭本书的任何部分。

本书封面贴有 **McGraw-Hill** 公司激光防伪标签,无标签者不得销售。

北京市版权局著作权合同登记 图字: 01-2004-2125 号

译者序

光纤通信领域所涉及的光纤、光放大器、波分复用和光分/插复用等关键技术的相继问世，使光纤通信领域中发生了一场又一场技术革命。光纤具有巨大的带宽资源，成为通信系统首选的传输媒质；光放大器代替了光-电-光中继器，实现了点到点的全光通信；波分复用不仅使单根光纤的传输容量增加了几倍、几十倍乃至几百倍，而且实现了多种不同类型的通信业务同时在一根光纤上传输；光分/插复用实现了信息在光域上的传送、路由的选择与交换，从而避免出现电子瓶颈的影响，完全满足了未来通信的高速率、大容量、远距离的全光通信要求。

为了满足光纤通信日新月异的发展需要，受人民邮电出版社的委托，我们集体翻译了这本《光纤通信》技术专著，以使我国广大从事通信工作的读者能对光纤通信的基本概念、光纤结构、光器件工作原理、光网络组网技术和光纤通信新技术等内容有所了解。

本书是由美国光学学会组织了 18 名国际知名的光纤通信专家集体编写而成的。作者都是长期在光纤通信各个领域从事研究工作的专家，所以本书的内容充分反映了他们具有很深的理论造诣和丰富的实践经验，以及他们在光纤通信技术中已经取得的最新研究成果。正是由于他们具有扎实的业务水平和很好的写作功底，从而使得我们在翻译本书的过程之中受益匪浅。

本书首先介绍了光纤通信原理，然后又阐述了采用光纤、光源和探测器、光放大器、波分复用和光分/插复用器等关键技术组成的光纤通信网络，以及红外光纤、光纤传感器等最新技术。同时，为使读者便于阅读和理解，在本书的每章中，作者都给出了参考文献。

本书的翻译分工为：胡先志（第 1~第 6 章），胡佳妮（第 7~第 8、第 10~第 13 章），陈肖洁（第 9 章），杜娟（第 14~第 16 章）。全书由胡先志统稿。

本书全面介绍了光纤通信领域中所涉及各个分支的技术内容。鉴于译者专业知识和英语水平有限，译文中难免有一些谬误和不足，敬请读者批评指正。

译者

2003 年 12 月于武汉

本书的作者单位及编写分工

Francisco Arregui 西班牙, 潘普洛纳, 纳瓦拉公共大学 (第 15 章)

Tom G. Brown 美国纽约, 罗切斯特, 罗切斯特大学光学研究所 (第 1 章)

John A. Buck 美国佐治亚州, 亚特兰大, 佐治亚技术学院电子与计算机工程系 (第 3 章和第 5 章)

Richard O. Claus 美国弗吉尼亚, 布莱斯堡, 弗吉尼亚理工学院 (第 15 章)

Casimer DeCusatis 美国纽约, 波普基西, IBM 公司 (第 6 章和第 16 章)

Peter J. Delfyett 美国佛罗里达, 奥兰多, 中佛罗里达大学光学学院/光学与激光研究和教育中心 (CREOL) (第 12 章)

Elsa Garmire 美国新罕布什尔, 汉诺威, 德特母斯学院 (第 4 章)

James A. Harrington 美国新泽西, 比斯卡塔维, 罗特格斯大学 (第 14 章)

Kenneth O. Hill 加拿大安大略, 渥太华, 新波光子学 (第 9 章)

Ira Jacobs 美国弗吉尼亚, 布莱斯堡, 弗吉尼亚理工学院和州立大学光纤和电-光研究中心 (第 2 章)

Guifang Li 美国佛罗里达, 奥兰多, 中佛罗里达大学光学学院/光学与激光研究和教育中心 (CREOL) (第 6 章)

P. V. Mamyshev 美国新泽西, 赫母德尔, 朗讯科技-贝尔试验室 (第 7 章)

Ignacio Matias 西班牙潘普洛纳, 纳瓦拉公共大学 (第 15 章)

Daniel Nolan 美国纽约, 纽约城, 康宁公司 (第 8 章)

Ulf Österberg 美国新罕布什尔, 汉诺威, 德特母斯学院 Thayer (第 11 章)

Joseph C. Palais 美国坦佩, 亚利桑那, 亚利桑那州立大学工程与应用科学院电子工程系 (第 10 章)

Alan E. Willner 美国洛杉矶南加利福尼亚大学电子工程系统系 (第 13 章)

Yong Xie 美国洛杉矶南加利福尼亚大学电子工程系统系 (第 13 章)

序 言

在近 30 年里, 光纤得到了飞速的发展, 目前光纤已经成为我们通信系统的干线。此外在许多医学诊断过程中光纤也起着关键的作用, 成为各种重要传感器的基础, 而且光纤被用于各种各样的激光加工的应用中。本书是光学手册 (第二版) 的一部分, 即第 4 卷。第 4 卷重点研究光纤和光纤通信系统。

本书所包括的内容涵盖了通信用光纤、器件和系统。我们要感谢 CREOL 光学学院的李贵方 (Guifang Li) 教授和 IBM 公司的 Casimir DeCusatis 博士在本书的各章内容的编排和邀请作者参编方面所做的贡献。他们努力的结果是在对光纤及光纤通信系统方面的问题进行逻辑连贯和内容详实的阐述。本书光纤部分所包含的一些内容与光学手册 (第二版) 第 4 卷有关非线性效应和量子光学的章节有所重叠。这是很自然的, 由于光限制在光纤中产生强光场和长距离的相互作用, 从而导致产生了重要的非线性效应。

本书共有 16 章。首先是对光纤和光纤通信作一个总的综述, 其内容最初源于光学手册 (第 2 版) 的第 2 卷。本书的其它章节取自于与光纤基本原理和器件问题有关的光学手册第 4 卷。这些内容包括讨论光纤中的非线性光学效应、光源、探测器、通信用的调制器、光纤放大器、光纤布拉格光栅以及红外光纤的章节。光纤通信系统问题将在所涉及的有关通信线路、光孤子、光纤耦合器、复用器、解复用器, 组网微型光学器件、半导体放大器与波长变换、时分/波分复用和光纤通信标准的章节进行讨论。同时, 本书还用了一章的篇幅专门介绍光纤传感器。

正是在美国光学学会的工作人员, 特别是 Alan N. Tairflotte 先生和 Laure Lee 女士的鼎力支持下, 光学手册 (第二版) 以及本主题卷才有可能正式出版。在此, 我们同样衷心感谢麦格劳-希尔公司的 Stephen 先生在本卷的出版过程中所付出的辛勤劳动。

主 编 Michael Bass
副主编 Eric W. Van Stryland

目 录

第 1 章 光纤与光纤通信	1
1.1 术语表	1
1.2 引言	3
1.3 工作原理	4
1.4 光纤色散与衰减	7
1.4.1 衰减	7
1.4.2 模间色散	8
1.4.3 材料色散	8
1.4.4 波导色散和折射率分布色散	8
1.4.5 描述光纤的归一化变量	9
1.4.6 光纤色散的计算	10
1.5 光纤的偏振特性	10
1.6 光纤的光学性能和机械性能	11
1.6.1 衰减测量	11
1.6.2 色散与带宽测量	13
1.6.3 光纤色散的位移与平坦	14
1.6.4 可靠性的评价	15
1.7 光纤通信	18
1.7.1 点到点线路	19
1.7.2 先进的传输技术	24
1.8 光纤的非线性光学性能	31
1.8.1 受激散射过程	31
1.8.2 脉冲压缩与光孤子传输	32
1.8.3 四波混频	34
1.8.4 光纤中的光折射非线性	34
1.9 光纤材料：化学与制造	35
1.9.1 常用光纤的制造	36
1.9.2 掺杂剂化学	37
1.9.3 其它制造方法	38
1.9.4 红外光纤制造	38
1.10 参考文献	39
1.11 进一步阅读的资料	43
第 2 章 光纤通信技术及系统概述	45

2.1	引言	45
2.2	基本技术	45
2.2.1	光纤	45
2.2.2	发射光源	48
2.2.3	光探测器	50
2.3	接收机灵敏度	50
2.4	速率和距离限制	53
2.4.1	提高速率	53
2.4.2	更长的中继距离	54
2.5	光放大器	54
2.5.1	半导体放大器和光纤放大器的比较	55
2.5.2	光放大器在通信中的应用	55
2.6	光纤网络	55
2.7	光纤中的模拟传输	56
2.7.1	载噪比 (CNR)	56
2.7.2	光纤中的模拟视频传输	57
2.7.3	非线性畸变	58
2.8	技术和应用方向	58
2.9	参考文献	59
第 3 章	光纤的非线性效应	62
3.1	光纤非线性光学的关键问题	62
3.2	自相位调制和交叉相位调制	63
3.3	受激拉曼散射	65
3.4	受激布里渊散射	68
3.5	四波混合	69
3.6	结论	72
3.7	参考文献	72
第 4 章	光纤通信系统用的光源、调制器和探测器	76
4.1	引言	76
4.2	双异质结结构激光二极管	78
4.2.1	一个密度反转注入有源区	78
4.2.2	在有源层平面内的载流子的限制	79
4.2.3	在有源层附近的光的限制	79
4.2.4	限制载流子注入条形几何结构	80
4.2.5	光的横向限制	80
4.2.6	传导光沿着条形方向上的后向反射	81
4.2.7	安装使光从侧面发出	82

4.2.8	适合封装在一个密封盒	82
4.2.9	光纤尾纤连接	82
4.2.10	寿命	83
4.3	激光二极管的工作特性	83
4.3.1	激光器阈值	83
4.3.2	光输出与电流输入 (L-I 曲线)	84
4.3.3	温度与激光器性能的关系	86
4.3.4	发光的空间特性	86
4.3.5	激光器光的光谱特性	88
4.3.6	偏振	88
4.4	激光二极管的瞬态响应	89
4.4.1	开通延迟	89
4.4.2	弛豫振荡	90
4.4.3	调制响应和增益饱和	92
4.4.4	频率啁啾	93
4.5	激光二极管的噪声特性	94
4.5.1	相对强度噪声 (RIN)	94
4.5.2	信噪比 (SNR)	95
4.5.3	多模激光器的模分配噪声	96
4.5.4	相位噪声—线宽	97
4.5.5	外部光反馈和相干破坏	97
4.6	量子阱激光器和应变激光器	101
4.6.1	量子阱激光器	101
4.6.2	应变层量子阱激光器	102
4.7	分布反馈 (DFB) 和分布布拉格反射器 (DBR) 激光器	104
4.7.1	分布的布拉格反射器 (DBR) 激光器	105
4.7.2	分布反馈 (DFB) 激光器	106
4.8	发光二极管 (LED)	108
4.8.1	面发光 LED	110
4.8.2	边发光 LED	112
4.8.3	LED 的工作特性	112
4.8.4	瞬态响应	113
4.8.5	驱动电路和封装	114
4.9	垂直腔表面发光激光器 (VCSEL)	114
4.9.1	量子阱的数量	115
4.9.2	镜面反射率	115
4.9.3	电注入	116
4.9.4	发射光的空间特性	117
4.9.5	光输出与电流输出	118

4.9.6	光谱特性	118
4.9.7	偏振	119
4.9.8	其它波长的 VCSEL	119
4.10	铌酸锂调制器	120
4.10.1	电-光效应	121
4.10.2	相位调制	123
4.10.3	Y形干涉型(马赫—曾德尔)调制器	123
4.10.4	高速工作	124
4.10.5	插入损耗	125
4.10.6	偏振无关	125
4.10.7	光反射率和光损伤	125
4.10.8	δ - β 反向调制器	125
4.11	光纤系统用电吸收调制器	126
4.11.1	电吸收强度调制	128
4.11.2	在半导体中施加一个电场	128
4.11.3	集成的调制器	129
4.11.4	工作特性	130
4.11.5	QW 中的电吸收的先进概念	131
4.12	电-光和电折射半导体调制器	132
4.12.1	半导体中的电-光效应	132
4.12.2	半导体中的电折射	132
4.12.3	半导体干涉型调制器	133
4.13	PIN 二极管	134
4.13.1	典型的几何形状	135
4.13.2	灵敏度(响应度)	136
4.13.3	速度	138
4.13.4	暗电流	139
4.13.5	光电二极管的噪声	140
4.14	雪崩光电二极管、MSM 探测器和肖特基二极管	142
4.14.1	雪崩探测器	142
4.14.2	MSM 探测器	144
4.14.3	肖特基光电二极管	144
4.15	参考文献	145
第 5 章	光纤放大器	148
5.1	引言	148
5.2	掺稀土元素放大器的结构和工作	149
5.2.1	泵浦配置和最佳的放大器长度	149
5.2.2	工作状态	149

5.3	EDFA 的物理结构和光的相互作用	150
5.3.1	EDFA 的能级	150
5.3.2	增益形成	150
5.3.3	EDFA 的泵浦波长的选择	151
5.3.4	噪声	152
5.3.5	增益平坦	152
5.4	其它稀土元素系统中的增益形成	153
5.4.1	掺镨光纤放大器 (PDFA)	153
5.4.2	掺铒/镱光纤放大器 (E/YDFA)	153
5.5	参考文献	153
第 6 章	光纤通信线路 (电信、数据通信和模拟)	156
6.1	引言	156
6.2	品质因数: SNR、BER、MER 和 SFDR	157
6.3	线路功率预算分析: 安装损耗	161
6.3.1	传输损耗	161
6.3.2	衰减与波长的关系	161
6.3.3	连接器损耗和接头损耗	161
6.4	线路功率预算分析: 光功率代价	162
6.4.1	色散	163
6.4.2	模分配噪声	165
6.4.3	消光比	167
6.4.4	多路串扰	167
6.4.5	相对强度噪声 (RIN)	167
6.4.6	抖动	168
6.4.7	模噪声	170
6.4.8	辐射引起的损耗	170
6.5	参考文献	171
第 7 章	光纤通信系统中的光孤子	174
7.1	引言	174
7.2	经典孤子的特性	174
7.3	光孤子的性能	177
7.4	经典的光孤子传输系统	178
7.5	频率导向滤波器	179
7.6	可调频率导向滤波器	180
7.7	波分复用	181
7.8	色散管理光孤子	183
7.9	波分复用色散管理光孤子传输	186

7.10	结论	188
7.11	参考文献	188
第 8 章	熔锥光纤耦合器、波分复用器和解复用器	193
8.1	引言	193
8.2	波长无关	194
8.3	波分复用	195
8.4	1×N 光功率分配器	196
8.5	开关和衰减器	196
8.6	马赫-曾德尔器件	196
8.7	偏振器件	197
8.8	结论	198
8.9	参考文献	198
第 9 章	光纤布拉格光栅	201
9.1	术语表	201
9.2	引言	201
9.3	光敏性	202
9.4	布拉格光栅的性能	203
9.5	光纤光栅的制造	204
9.6	光纤光栅的应用	207
9.7	参考文献	208
第 10 章	组网的微光器件	211
10.1	引言	211
10.2	通用的器件	211
10.3	网络功能	211
10.3.1	衰减器	212
10.3.2	光功率分配器和方向耦合器	212
10.3.3	隔离器	212
10.3.4	环形器	212
10.3.5	复用器/解复用器/双工器	213
10.3.6	机械开关	213
10.4	子器件	213
10.4.1	棱镜	213
10.4.2	光栅	214
10.4.3	滤波器	214
10.4.4	光束分路器	214
10.4.5	法拉第旋转器	215

10.4.6	偏振器	215
10.4.7	自聚焦棒透镜	215
10.5	器件	215
10.5.1	衰减器	216
10.5.2	功率分配和方向耦合器	216
10.5.3	隔离器和环路器	216
10.5.4	复用器/解复用器/双工器	217
10.5.5	机械开关	217
10.6	参考文献	218
第 11 章	半导体光放大器和波长转换	219
11.1	术语表	219
11.2	为什么要进行光放大	220
11.2.1	光纤放大器	221
11.2.2	半导体放大器	221
11.3	为什么要进行光波长转换	224
11.3.1	改变光波长的方案	224
11.3.2	半导体光波转换器	225
11.4	参考文献	225
第 12 章	光时分复用通信网络	227
12.1	术语表	227
12.1.1	定义	227
12.1.2	缩写	227
12.1.3	符号	228
12.2	引言	229
12.2.1	基本概念	229
12.2.2	取样	229
12.2.3	抽样定理	230
12.2.4	插入	232
12.2.5	解复用——发射机和接收机的同步	234
12.2.6	数字信号——脉冲编码调制	234
12.2.7	脉冲编码调制	235
12.2.8	模-数转换	236
12.2.9	二进制数字和线路编码的光表示方法	236
12.2.10	定时恢复	238
12.3	时分复用和时分多址	240
12.3.1	概述	240
12.3.2	时分多址	240

12.3.3	光域 TDMA	242
12.3.4	时分复用	243
12.3.5	帧与体系	244
12.3.6	SONET 和频率调整	245
12.4	器件技术介绍	247
12.4.1	光时分复用——串行与并行	247
12.4.2	器件技术——发射机	247
12.4.3	法布里-珀罗激光器	248
12.4.4	分布反馈激光器	249
12.4.5	锁模激光器	251
12.4.6	直接调制或间接调制	252
12.4.7	外调制	253
12.4.8	电光调制器	253
12.4.9	电吸收调制器	254
12.4.10	光时钟恢复	255
12.4.11	解复用的全光交换	258
12.4.12	接收机系统	259
12.4.13	超高速光时分复用光线路——一个论文实例	261
12.5	总结与展望	262
12.6	进一步阅读的资料	262
第 13 章	波分复用 (WDM) 光纤通信网络	264
13.1	引言	264
13.1.1	光纤带宽	264
13.1.2	WDM 技术介绍	265
13.2	光纤损伤	266
13.2.1	色散	266
13.2.2	光纤非线性	268
13.2.3	色散补偿和色散管理	270
13.3	WDM 网络的基本结构	273
13.3.1	点到点线路	273
13.3.2	波长路由网络	274
13.3.3	WDM 星、环和网状结构	274
13.3.4	网络重构性	275
13.3.5	电路交换和数据包交换	276
13.4	WDM 网络中的掺铒光纤放大器	278
13.4.1	EDFA 级联的增益峰化	278
13.4.2	EDFA 增益平坦	279
13.4.3	快速功率瞬变	280

13.4.4	超宽带 EDFA	281
13.5	动态信道功率均衡	282
13.6	WDM 中的串扰	284
13.6.1	非相干串扰	284
13.6.2	相干串扰	284
13.7	总结	286
13.8	致谢	286
13.9	参考文献	287
第 14 章	红外光纤	294
14.1	引言	294
14.2	非氧化物和重金属氧化物玻璃 IR 光纤	297
14.2.1	HMFG 光纤	297
14.2.2	锗酸盐光纤	299
14.2.3	硫化物光纤	299
14.3	晶体光纤	300
14.3.1	PC 光纤	301
14.3.2	SC 光纤	302
14.4	空心波导	303
14.4.1	空心金属和塑料波导	304
14.4.2	空心玻璃波导	304
14.5	总结和结论	306
14.6	参考文献	306
第 15 章	光纤传感器	310
15.1	引言	310
15.2	非本征法布里-珀罗干涉传感器	310
15.3	本征法布里-珀罗干涉传感器	312
15.4	光纤布拉格光栅传感器	313
15.4.1	工作原理	313
15.4.2	布拉格光栅传感器制造	314
15.4.3	布拉格光栅传感器	315
15.4.4	布拉格光栅应变传感器的限制因素	316
15.5	长周期光栅传感器	316
15.5.1	工作原理	317
15.5.2	LPG 制造过程	317
15.5.3	长周期光栅的温度敏感性	319
15.6	传感方案的比较	320
15.7	结论	320

15.8	参考文献	320
15.9	进一步阅读的资料	322
第 16 章	光纤通信标准	323
16.1	引言	323
16.2	ESCON	323
16.3	FDDI	324
16.4	光纤通道标准	325
16.5	ATM/SONET	327
16.6	吉比特以太网	328
16.7	参考文献	329