

韦乐平 张成良 编著

中国通信学会主编 人民邮电出版社

光网络——系统、器件与联网技术

通信工程丛书



通信工程丛书

光 网 络

——系统、器件与联网技术

韦乐平 张成良 编著

中国通信学会主编 • 人民邮电出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

光网络: 系统、器件与联网技术 / 韦乐平, 张成良编著.

—北京: 人民邮电出版社, 2006.10

(通信工程丛书)

ISBN 7-115-15244-6

I. 光... II. ①韦... ②张... III. 光纤通信—通信网
IV. TN929.11

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 104282 号

通信工程丛书

光网络——系统、器件与联网技术

◆ 编 著 韦乐平 张成良

责任编辑 王晓明

◆ 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>

北京铭成印刷有限公司印刷

新华书店总店北京发行所经销

◆ 开本: 850×1168 1/32

印张: 32.375

插页: 4

字数: 855 千字

2006 年 10 月第 1 版

印数: 1—4 000 册

2006 年 10 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-115-15244-6/TN · 2852

定价: 68.00 元

读者服务热线: (010) 67129258 印装质量热线: (010) 67129223

内 容 提 要

本书是一本专门介绍光网络的技术图书，内容涉及到三代光网络的技术、标准和工程应用。全书共 19 章，内容包括：概述、光纤光缆、有源光器件、无源光器件、光放大系统的传输损伤、SDH 传送网、波分复用传输系统、光传送网结构、网络保护和恢复、光传送网网络节点接口光传送网功能、光传送网物理层接口、光分插复用和光交叉连接、光传送网网络性能、光传送网管理、光因特网、自动交换光网络、高速光系统设计和工程考虑、光网络测试等。

本书内容全面，论述翔实，深入浅出，可读性强，理论与实践相结合，可供通信行业的各级各类工程技术人员、管理人员在工作中学习和参考，也可作为通信院校电信工程专业和信息工程专业师生的参考读物。

前 言

光纤通信的诞生与发展是电信史上的一次重要革命，其容量发展速度超过了受摩尔定律限定的电交换机和路由器的发展速度，而且也超过了数据业务的增长速度，成为历史上发展最快的技术领域之一。然而，本世纪之初，由于网络泡沫、光纤泡沫和 3G 泡沫的破灭使世界电信业陷入了空前的困境，光纤通信首当其冲。幸运的是，电信的内在需求没有根本改变，人们没有少打电话，也没有少上网，移动短信业务如火如荼，对等通信（P2P）应用迅速崛起，IP 电视（IPTV）业务蓄势待发，电信业务市场继续成长，世界网络带宽需求的年增长率依然高达 50%~100%，而我国在过去几年里的干线业务带宽需求的年增长率超过 200%。显然，当前的困境只是放慢了发展的速度，绝不会也不可能停止电信技术和业务的发展。

从光纤通信技术本身的发展看，近年来，光网络成为活跃的领域。有关的基本标准框架工作和多数标准已经完成；从元器件技术看，大量新技术、新设计、新器件和新工艺正在不断涌现；从光纤光缆的角度看，新型光纤已经开始大规模应用，更新更优的设计还在不断出现；从系统角度看，点到点的 WDM 系统已经大量应用，总容量在不断突破，应用范围在不断延伸，传输成本在不断降低；从网络角度看，各种光网络已经问世并投入实际运行。面对这一发展趋势，作者深感有必要以光网络为主线，将有关的技术资料系统地编写成书，供广大读者学习参考，也为光网络在我国的发展贡献一份力量。

本书内容共 19 章，第 1 章从发展下一代网的必然性开始引出发展下一代光网络的必要性，并简要介绍了光传送网的基本概念、光网络的透明性问题以及光传送网和自动交换光网络的标准概貌；第

2 章主要介绍光纤的种类、结构、主要参数、规范以及新型光纤的特性。第 3 章介绍各类光源、光检测器、光集成和光电集成电路以及光放大器的分类、原理、特性和应用。第 4 章介绍光功率分路器、星形耦合器、波分复用器件 (WDM)、光开关器件、光调制器和光纤光栅器件的分类、原理、特性和应用。第 5 章旨在针对与光放大器有关的各种传输损伤的分类、机制、传输限制和对策进行深入分析和探讨。第 6 章主要讲述 SDH 的基本原理、光接口的规范、超高速传输的基本特点、下一代 SDH 标准和城域网多业务平台。第 7 章主要讲解波分复用的原理、在城域网中的应用、对器件和光纤的要求以及波分复用系统的光接口和光路设计等。第 8 章介绍通用的传送网功能体系结构、从电联网走向光联网的必然趋势、光传送网的功能体系结构以及下一代传送网的可选网络结构。第 9 章介绍网络生存性的概念、网络保护和恢复的总体考虑、电层和光层的保护与恢复方法及设计考虑,最后简要讨论网络的多层生存性问题。第 10 章详细介绍光网络节点接口的光通路开销、基本信号结构、复用和映射结构、光通路传送单元、各种客户信号的映射方式等。第 11 章主要介绍 OTN 的通用进程和层功能描述,重点是光传输层功能、光复用段层功能、光通路层功能、OTUk 层功能和 ODUk 层功能。第 12 章着重介绍光传送网的物理层接口,主要是域间接口,也简要探讨了横向兼容性设计和光安全性进程问题。第 13 章重点介绍 OADM 和 OXC 两种设备的形态与应用,重点讨论全光 OXC 节点结构,并对不同结构进行了比较,还讨论了混合光电光 OXC 的特点及其控制平面。第 14 章系统地介绍各种导致网络性能劣化的数字和模拟损伤的概念和影响、损伤的产生和分布、性能的规范和监测等。第 15 章首先介绍 TMN 基础,然后讲述 WDM 系统的管理和 OTN 管理网和管理功能,接下来重点介绍 ASON 网管系统的特点,最后讲述网管分级结构和多厂家环境下的网管互操作问题。第 16 章主要介绍光因特网的基本概念、路由选择协议、路由器原理和发展以及 MPLS 技术、IP 传送技术的特点和应用。第 17 章介绍自动

交换光网络的基本概念、控制面的功能要求和结构、网管能力和网络性能要求等,接下来论述了 IP 层与光传送层的融合以及两种基本网络演进结构的特点;最后,简要介绍将 MPLS 应用于光层后的特点。第 18 章集中讲述光系统工作频带的规定、线路码的考虑、光网络拓扑、光传输设计考虑、最坏值法系统设计和统计法系统设计、误码率和光信噪比、前向纠错码、纵向和横向兼容性考虑等系统设计问题的考虑和原则。第 19 章首先系统地介绍 WDM 线路系统的测试问题,然后讨论 FEC 和 T-MUX 的测试方法,接下来讲述 SDH 超长复用段保护环 APS 的测试,最后介绍光网络和 ASON 网络的特有测试内容。

全书由韦乐平和张成良执笔,其中第 1~9 章、第 16~18 章共 12 章由韦乐平编写,第 10~15 章、第 19 章共 7 章由张成良编写,韦乐平负责全书的总校。

光网络涉及从元器件到系统和网络的多学科的技术和标准,内容十分丰富和庞杂,而且技术和标准本身尚在不断发展之中,加之作者学识和写作时间均十分有限,尽管历经 7 年多时间的写作和反复修改和补充,但是书中不尽如人意乃至谬误之处仍在所难免,敬请读者不吝赐教。

作 者

2006 年 7 月于北京

目 录

第 1 章 概论	1
1.1 电信网的总体架构.....	1
1.2 发展下一代电信网的驱动力	3
1.3 传送网和光传送网的基本概念	6
1.4 光网络的透明性.....	9
1.5 OTN 与 ASON 的标准概貌	13
参考文献.....	16
第 2 章 光纤光缆	17
2.1 光纤的种类.....	17
2.2 光纤光缆的主要参数.....	21
2.2.1 光纤的属性.....	22
2.2.2 光缆的属性.....	30
2.2.3 链路的属性.....	31
2.3 主要参数的规范.....	32
2.3.1 光纤光缆主要参数的规范	33
2.3.2 ITU-T 有关光纤光缆主要参数的规范	37
2.3.3 用于系统设计的光缆链路参数	43
2.4 新型光纤和特殊光纤.....	44
2.4.1 非零色散光纤.....	45
2.4.2 低水峰光纤.....	53
2.4.3 色散补偿光纤.....	55
参考文献.....	59
第 3 章 有源光器件	61
3.1 光源.....	61

3.1.1	半导体激光器	61
3.1.2	发光二极管	75
3.2	光检测器	79
3.2.1	光检测器的主要特性	79
3.2.2	PIN 管	82
3.2.3	APD 管	84
3.3	光集成与光电集成器件	87
3.3.1	光集成器件	87
3.3.2	光电集成电路	89
3.4	光放大器	93
3.4.1	光放大器的特点和分类	93
3.4.2	掺铒光纤放大器	95
3.4.3	掺镨氟基光纤放大器	107
3.4.4	光纤喇曼放大器	108
3.4.5	半导体光放大器	117
3.4.6	掺铒波导放大器	120
3.5	全光波长变换器	122
3.5.1	概述 ^{[1]-[14]}	122
3.5.2	AOWC 的类型和机理	123
	参考文献	128
第 4 章	无源光器件	130
4.1	光纤耦合器	130
4.2	星形耦合器	136
4.3	波分复用器件	138
4.3.1	基本工作原理	138
4.3.2	衍射栅型 WDM 器件	141
4.3.3	介质膜滤波器型 WDM 器件	144
4.3.4	熔锥型 WDM 器件	147
4.3.5	集成光波导型 WDM 器件	148

4.3.6	光纤光栅型 WDM 器件	151
4.3.7	光间插器	152
4.4	光开关器件	154
4.4.1	光开关的分类	155
4.4.2	机械光开关 ^[8]	156
4.4.3	固体波导光开关	157
4.4.4	其他开关	161
4.4.5	微电子机械开关 ^{[14]~[17]}	164
4.4.6	各类光开关的比较	173
4.5	光调制器	174
4.5.1	电光调制器	174
4.5.2	电吸收调制器	178
4.6	光纤光栅器件	180
4.6.1	光纤光栅的工作原理和特性	180
4.6.2	光纤光栅的制作和应用	183
	参考文献	187
第 5 章	光放大系统的传输损伤	189
5.1	光放大系统传输损伤的分类	189
5.2	光纤非线性损伤	190
5.2.1	克尔效应	191
5.2.2	受激散射	202
5.3	极化特性	206
5.4	色度色散特性	217
5.5	其他与光放大器相关的损伤	222
	参考文献	227
第 6 章	SDH 传送网	229
6.1	SDH 的基本概念和特点	229
6.2	SDH 的速率和帧结构	231
6.3	SDH 复用和映射方法	234

6.4 SDH 光接口分类与规范	237
6.5 SDH 组网应用	251
6.6 高速光纤传输系统的硬件技术和光接口	255
6.6.1 高速光纤传输系统的硬件技术	255
6.6.2 40Gbit/s 系统的特殊问题	257
6.6.3 使用光纤放大器的系统光接口	261
6.7 下一代 SDH 标准和城域网多业务平台	273
6.7.1 下一代 SDH 标准	273
6.7.2 城域网多业务平台	278
参考文献	291
第 7 章 波分复用传输系统	293
7.1 波分复用传输	293
7.1.1 波分复用传输原理	293
7.1.2 两种传输方式的特点	296
7.1.3 波分复用系统的容量演进和极限	298
7.2 波分复用系统	302
7.3 波分复用系统器件和光纤的选择	304
7.4 波分复用系统的光接口和光路设计	308
7.4.1 光接口分类	309
7.4.2 光接口参数定义和规范	312
7.4.3 光放大器的增益箝制技术	317
参考文献	321
第 8 章 光传送网结构	322
8.1 传送网功能结构	322
8.1.1 传送网的基本概念	322
8.1.2 网络构件 ^[1]	323
8.1.3 网络的分层和分割 ^[1]	333
8.2 从电联网向光联网的演进	347
8.2.1 传送网面临的挑战	347

8.2.2	从 SDH 向 WDM 演进	347
8.2.3	从 WDM 向 ASON 和全光网的演进	348
8.3	光传送网功能结构	354
8.3.1	光网络的传送功能结构	354
8.3.2	光传送网的分割	366
8.3.3	光传送网管理	370
8.3.4	光传送网生存性	378
8.3.5	不同管理域的互连和互通	381
8.4	下一代传送网的可选网络结构	385
8.4.1	IP 业务对传送网结构的影响	385
8.4.2	各种可选传送网结构的特点	386
	参考文献	388
第 9 章	网络保护和恢复	389
9.1	网络的生存性	389
9.2	网络保护和恢复	393
9.2.1	保护和恢复概念	393
9.2.2	保护和恢复分类	396
9.3	SDH 保护和恢复	400
9.3.1	保护方式与机理	400
9.3.2	恢复方式与机理	414
9.3.3	各种保护和恢复方法的比较和协调	427
9.4	OTN 的保护和恢复	429
9.4.1	光层保护恢复概述	429
9.4.2	基本保护恢复方法分类	433
9.5	网络的多层生存性	442
	参考文献	449
第 10 章	光传送网节点接口	452
10.1	概述	452
10.2	光通路开销	454

10.3	光网络接口与基本信号结构	457
10.3.1	基本信号结构	459
10.3.2	ONNI 信息结构定义	460
10.4	复用原理	463
10.4.1	OTM- n 复用和映射结构	463
10.4.2	比特率与容量	467
10.4.3	光传送模块	469
10.4.4	OTM- n 域内接口	470
10.5	光通路信息结构	472
10.5.1	OTUk 帧结构	472
10.5.2	ODUk 帧结构	473
10.5.3	OPUk 帧结构	473
10.5.4	API 接入点标识	474
10.5.5	OTUk 开销功能	477
10.5.6	ODUk 开销功能	481
10.5.7	OPUk OH 描述	491
10.5.8	OTUk、ODUk、OPUk 之间的关系	496
10.6	OTM 开销与维护信号	497
10.6.1	OTM 层开销	498
10.6.2	管理维护信号	500
10.7	光接口的传输控制和前向纠错	501
10.8	客户信号的映射	503
10.8.1	CBR2G5、CBR10G、CBR40G 信号映射进 OPUk ..	503
10.8.2	ATM 信元映射进 OPUk	506
10.8.3	GFP 帧信号映射进 OPUk	507
10.8.4	测试信号映射进 OPUk	508
10.8.5	非特定客户比特流映射进 OPUk	510
10.9	OPUk 虚级联	511
10.9.1	OPUk 虚级联	512

10.9.2 OPUk-Xv 开销描述	513
10.10 向 OTN 光传送网演进的方案和策略	522
参考文献	526
第 11 章 光传送网功能	527
11.1 概述	527
11.2 监控过程和管理信息流	537
11.3 OTN 通用进程	545
11.4 OTN 层功能描述	554
11.4.1 光传输层功能	554
11.4.2 光复用段层功能	564
11.4.3 光通路层功能	568
11.4.4 OTUk 层功能	572
11.4.5 ODUk 层功能	575
参考文献	589
第 12 章 光传送网物理层接口	590
12.1 Pre-OTN 光接口	590
12.1.1 OTN 与 Pre-OTN	590
12.1.2 OTN 单通路接口	591
12.1.3 OTN 多通路接口	592
12.2 术语和参数的定义	592
12.3 光接口分类	593
12.3.1 参考点	593
12.3.2 系统代码	597
12.3.3 多通路域间接口	598
12.3.4 单通路域间接口	599
12.3.5 IaDI 应增加的接口及其参数	605
12.4 IrDI 光接口参数要求	606
12.4.1 IrDI 多通路域间接口物理层参数要求	606
12.4.2 IrDI 单通路域间接口要求	608

12.4.3 CWDM 系统光接口	610
12.5 OTN 系统的横向兼容性设计考虑	612
12.6 光安全进程	615
12.6.1 光功率安全性	615
12.6.2 APR 功能和要求	616
12.6.3 采用 OSC 实现重新启动进程的系统	617
参考文献	618
第 13 章 光分插复用和光交叉连接	620
13.1 OADM 和 OXC 在网络中的位置	620
13.2 OADM 节点结构	621
13.3 ROADM 结构与 OADM 应用分析	624
13.4 OADM 实现方案	629
13.5 全光交叉连接的特点与结构	634
13.6 全光交叉连接节点分类	637
13.6.1 基于空间交换的全光 OXC 结构	638
13.6.2 基于波长交换的全光 OXC 结构	645
13.6.3 全光 OXC 的挑战	648
13.7 光电光 OXC 与全光 OXC	648
13.8 光电光混合交叉连接 OXC	654
参考文献	658
第 14 章 光传送网网络性能	659
14.1 误码特性	659
14.1.1 误码的概念和影响	659
14.1.2 误码的产生和分布 ^{[1]-[5]}	660
14.1.3 误码性能的规范	662
14.1.4 OTN 误码性能监控	664
14.1.5 OTN 多运营商国际通道的误码性能参数	670
14.1.6 OTN 多运营商国际通道维护与投入服务指标	675
14.2 抖动特性	678

14.2.1	抖动的概念和影响	678
14.2.2	抖动的产生	679
14.2.3	OTUk 接口网络输出抖动和漂移	681
14.2.4	OTN 网络接口抖动和漂移容限	683
14.2.5	ODUk 时钟要求	687
14.2.6	抖动积累模型和分析	696
14.2.7	STM- <i>n</i> 客户信号在 OTN 中传送同步的要求	700
14.2.8	CBRx 和 ODUj[i]负载抖动积累特性分析	702
14.3	光信号的监视	703
14.3.1	光监测参数劣化和光损伤之间的关系	704
14.3.2	监测方法的分类	706
14.3.3	光监视参数	708
14.3.4	光性能的监视方法	712
	参考文献	713
第 15 章	光传送网管理	715
15.1	TMN 基础	715
15.1.1	TMN 的结构 ^{[1], [2]}	716
15.1.2	TMN 的功能 ^[4]	730
15.2	光传送网网元管理要求	732
15.2.1	OTN 管理结构	733
15.2.2	OTN 管理功能	740
15.3	WDM 系统网络管理功能	744
15.4	ASON 管理平面总体结构	755
15.5	ASON 管理平面与传统网管系统的关系	766
15.6	DCN 网络	770
15.7	网管分层结构与多厂商网管互操作性	772
	参考文献	774
第 16 章	光因特网	776
16.1	概述	776

16.2	IP 业务量的特点	778
16.3	网络互联与路由器 ^{[1], [2]}	781
16.3.1	网络互联	781
16.3.2	路由选择原理和协议	783
16.3.3	路由器	791
16.4	MPLS 技术和应用	800
16.5	IP 传送技术	806
16.6	光因特网基本结构和参考模型	812
	参考文献	817
第 17 章	自动交换光网络	818
17.1	自动交换光网络的基本概念和标准化	818
17.2	控制面功能要求	823
17.2.1	控制面基本功能	823
17.2.2	支持连接管理的控制面功能	830
17.2.3	信令进程 — 连接管理过程	837
17.2.4	信令网	839
17.2.5	网络拓扑的隐藏性和资源管理	842
17.3	传送资源及其组织	843
17.4	控制面结构	845
17.4.1	概述	845
17.4.2	策略和联邦	847
17.4.3	结构元件	849
17.4.4	用于连接建立的元件间交互	858
17.5	网管能力和网络性能要求	863
17.6	网络的演进结构	865
17.6.1	IP 层与光传送层的融合	865
17.6.2	网络的演进结构 ^{[14]~[17]}	868
17.6.3	将 MPLS 应用于光层后的特点和适配 ^{[18]~[23]}	875
	参考文献	883