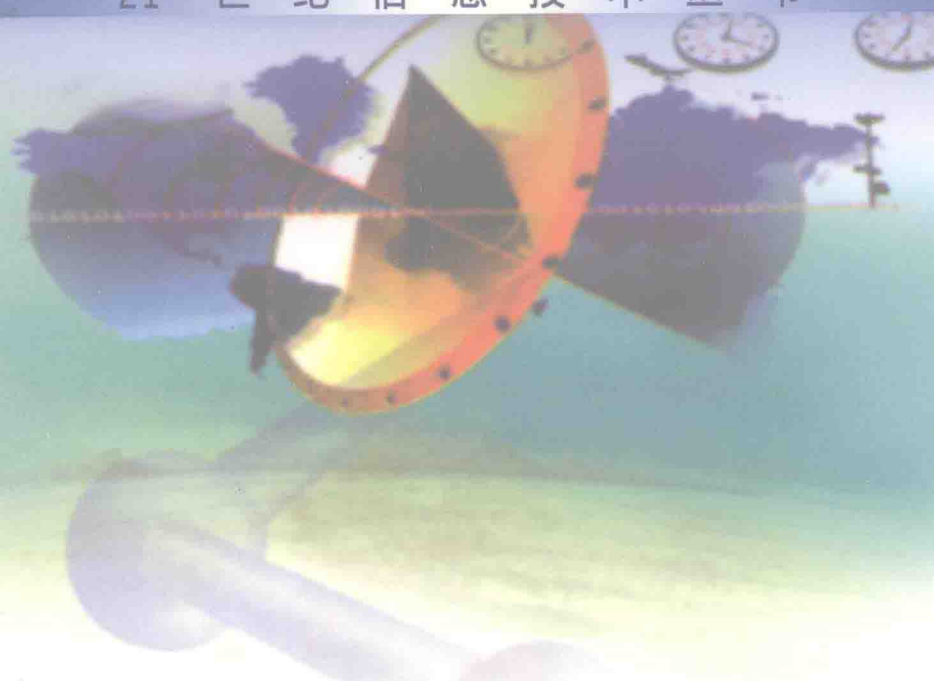


21 世纪 信 息 技 术 丛 书



全 光 通 信 网

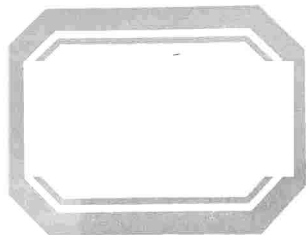
QUANGUANG TONGXINWANG

(修 订 版)

顾晚仪 张杰 编著



北京邮电大学出版社
www.buptpress.com



·技术丛书》

全 光 通 信 网

(修订版)

顾晓仪 张 杰 编著

北京邮电大学出版社

· 北 京 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

全光通信网/顾畹仪, 张杰编著. —修订版. —北京: 北京邮电大学出版社,
2001 (21 世纪信息技术丛书)

ISBN 7-5635-0395-1

I. 全… II. ①顾… ②张… III. 光通信-通信网 IV. TN915.63

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2001) 第 083147 号

全 光 通 信 网

(修订版)

编 著 顾畹仪 张 杰

责任编辑 郑 捷

*

北京邮电大学出版社出版发行

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

北京源海印刷厂印刷

*

850 mm × 1 168 mm 1/32 印张 7.625 字数 194 千字

2001 年 11 月第 2 版 2001 年 11 月第 1 次印刷

印数: 1—5 000 册

ISBN 7-5635-0395-1/TN·179 定价: 17.90 元

• 21 世纪信息技术丛书 •

编 委 会

主 任：叶培大

副主任：林金桐 钟义信

编 委：(按姓氏笔划排序)

马 严 乐光新 叶 敏

刘元安 吕廷杰 朱其亮

纪越峰 杨义先 杨放春

孟洛明 宋俊德 郭 军

赵尔沅 顾晚仪 梁雄健

修 订 版 说 明

“跨世纪信息技术丛书”出版后，引起信息通信领域广大技术人员、管理人员以及高校相关专业师生竞相传阅。目前该丛书已发行数万套，这在专业科技图书的出版中并不多见，并且因为该丛书选题新颖、内容领先而荣获全国高校出版社优秀畅销书奖。

然而信息通信技术的发展一日千里，技术更新的周期越来越短，发展速度越来越快。应广大读者的要求，我们组织丛书的作者对各册内容进行了修订。在此，我们向这些作者对修订版工作的积极配合表示深深地谢意。他（她）们均是我校在教学科研领域里颇有建树的学科带头人和技术中坚，教学、科研任务繁重，但仍然抽出大量宝贵的时间认真对原书进行了重新修订。其中部分书稿为了及时跟踪技术的前沿进展，几乎对全书内容进行了重新组织和编写，使其焕然一新。

进入新世纪，我们将此丛书更名为“21 世纪信息技术丛书”，不仅仅是基于时间变化上的考虑，更重要的是：信息技术仍然是现代技术体系中的主导技术，并且是更新速度最快的技术之一。所以我们希望这套丛书今后仍然以不变的风格和作者、不断更新的内容来满足读者的要求，同时也真诚地欢迎读者提出宝贵建议，使这套丛书不断地完善起来。

北京邮电大学出版社

2001 年 11 月

· 1 ·

总 序

信息化浪潮如日中天，它描绘出现代化之旅的时代画卷。信息技术如同一架强劲的发动机，不管人们对它的应用持何种态度，我们都不得不跟上它的步伐。信息技术在其应用中所赋有的强渗透性和高附加值，而成为信息时代的核心技术和中坚力量，它影响和决定着现代技术总体的走向。

网络的平民化和商业化为 50 年代以来的新信息革命提供了一次转机，这一转机就是 80 年代之后，网络逐步取代电脑成为信息社会的核心技术，亦即电脑成为网络的终端，而并非网络作为电脑的外围。这一革命性的变化，同时演绎出现代通信的时代意义：通信不仅仅作为信息传递的手段，它还能在信息存储和转换、信息处理和收发等方面扩展着自身的功能。现代通信向着信息业全面延伸，现代通信的内涵就是信息网络，就是国家或国际的信息基础结构（俗称“信息高速公路”）的技术平台。从这种意义上看，现代通信的技术，正成为信息技术体系中的主导和基质。

北京邮电大学作为国内通信领域著名大学，聚集着一批学识卓越的中青年技术专家，他们作为信息技术某一领域的领衔人物，始终站在信息技术研发活动中的前沿地带。他们把自己在国外或国内获得的最新知识和丰硕成果，把自己对信息技术的深刻理解，连同他们的智慧和热情，凝聚在这套“跨世纪信息技术丛书”之中，呈现给读者。

纵览这套丛书，这其中有执全光通信领域研究之牛耳的顾婉仪教授对波分复用(WDM)全光通信网作为光纤通信未来发展首选方案的据理力争；有国内外知名的信息安全权威杨义先教授对

网络与信息安全技术前沿及趋势的恢宏论述；有网管及通信软件专家孟洛明教授对现代网络管理技术的通览；有智能网领域成果斐然的杨放春教授对智能化现代通信网的诠释；有目前我国电子商务炙手可热的学者吕廷杰教授对我国实现电子商务软环境及社会影响等给予的引人注目的回答；有光纤通信专家纪越峰教授对综合业务接入技术和光波分复用系统的精辟论述；有 CERNET 专家马严教授对计算机互联网技术及其演进的展望；有刘元安和郭军两位年轻的博士生导师分别对未来移动通信和智能信息技术所作的前瞻性的描述。

我们认为这几位中青年学俊，从他们各自所在的重点研究项目和教学工作中抽出时间来写作这套丛书，其意义丝毫不亚于他们手头的一两个项目。这些年轻的博士生导师不仅仅是最新信息技术的生产者，而且是这些最新知识的整理者和传播者。他们点拨出热门技术中的技术轨道，直叙其来龙去脉，如数家珍，娓娓动听。他们为了整个文稿简捷、生动、明快而不厌其烦地几易其稿，这令我们既感动又宽慰。北京邮电大学出版社为这套丛书的出版倾注了大量的精力，我们谨此致以诚挚的谢意。是为序。

丛书编委会
1999 年 10 月

前 言

随着网络化时代的到来，人们对信息的需求与日俱增。IP 业务在全球范围突飞猛进的发展，在给传统电信业务带来巨大冲击的同时，也为电信网的发展提供了新的机遇。从当前信息技术发展的潮流来看，建设高速大容量的宽带综合业务网已成为现代信息技术发展的必然趋势。为了适应这种需求，通信的两大组成部分——传输与交换，都在不断地发展与变革。

波分复用技术的实用化，使光纤的传输容量极大提高，为高速大容量的宽带综合业务网的传输提供了有效途径。而传输容量的飞速增长带来的是对交换系统发展的压力和动力。基于波长路由概念而发展起来的全光通信网正是适应这种需要而诞生，并被认为是网络升级的优选方案。近几年来，密集波分复用技术的发展提供了利用光纤带宽的有效途径，使点到点的光纤大容量传输技术取得了突出进展。由于电子器件本身的物理极限，传统的电子设备在交换容量上难以再有质的提高，交换过程引入的“电子瓶颈”问题成为限制通信网络吞吐能力的主要因素。因此，研制全光的交叉连接（OXC）和分插复用（OADM）设备，成为建设大容量通信干线网络的发展趋势。

WDM 全光网具有可重构性、可扩展性、透明性、兼容性、完整性和生存性等优点，是目前光纤通信领域的研究热点和前沿。以美国为代表的北美地区、欧洲联盟以及亚洲的日本都已开展了光网络技术的研究，并进行了系统性的大规模网络应用试验。我国自 1996 年开始设立国家级项目，研究波分复用全光网，

并取得突出进展。可以预言，全光网的研究和实用化进程，必将使网络的性能和业务的提供能力跨上新的台阶。

本书凝聚了作者所在课题组多年来的研究成果，广泛收集了国内外相关资料，参照了ITU-T最新建议（含草案），并包含了申云峰、刘雪原、林绵锋、李晗、何建吾、罗来荣、方来付、何华杰、孙健等同志在完成他们的博士（或硕士）论文过程中所作的工作。

波分复用全光网是一项全新的技术，由于作者水平有限，书中难免有错误、不当之处，敬请广大读者批评指正。

作 者

1999 年 9 月于北京

修 订 版 前 言

本书 1999 年 11 月出版以来,受到广大读者的关注和专家的指点,作者在此深表感谢。

与 1999 年出版此书时的情况相比,全光通信网有了长足的发展,其实用化进程也比当时预想的要快得多。对全光通信网不仅发达国家投入巨大的人力和物力进行实验和研究,在我国,国家自然科学基金立项建立的中国高速光互联网(NSFCNnet)已与美国 Internet2 连通,国家 863 计划建立的中国高速光示范网(CAIN-ONET)也正在进行现场实验。

全光网发展中的一个重要趋势是 IP 网与光网的融合。近几年来,IP 业务爆炸式的发展,对网络的带宽和容量提出越来越高的要求。全光网宽带、大容量的特点和高度的灵活性、生存性使之成为承载 IP 业务的最佳选择。因此,IP over WDM 成为近年来的热门研究课题。

伴随多业务的接入和对光网络的研究向纵深发展,网络的智能化和自动化提到研究日程,自动交换光网络(ASON)的概念应运而生,显示了下一代光网络的雏形。

本书这次再版,对原书的内容略作修改,同时增加了新的一章:IP over WDM,论述了各种 IP over WDM 方案,介绍了下一代光网络的发展趋势。

作 者

2001 年 10 月于北京

目 录

1

光交换原理与发展

1.1 空分光交换	2
1.2 时分光交换	4
1.3 波分光交换	6
1.4 复合光交换	7
1.5 波分复用全光网的兴起与发展	10

2

WDM 全光网的分层结构和网络结构

2.1 光传送网的分层结构	12
2.2 WDM 全光网拓扑结构	13
2.2.1 全光网络的拓扑结构	14
2.2.2 拓扑结构的主要议题	18
2.2.3 波长通道网络和虚波长通道网络	22
2.3 WDM 环形网络	24

2.3.1 单向两纤环结构	26
2.3.2 双向两纤环	31
2.3.3 四纤 WDM 环	33
2.3.4 多纤环	34
2.3.5 环形网络的保护	35
2.4 国内外光网络研究概况及发展趋势	38

3

WDM 光传送网的节点结构和功能结构

3.1 光交叉连接 (OXC) 的节点结构	44
3.1.1 OXC 的性能指标	44
3.1.2 OXC 节点结构的分析与比较	46
3.1.3 结构的比较与讨论	55
3.2 光分插复用器的节点结构	56
3.3 光传送网的功能结构	64
3.3.1 光传送网设备的规范方法	64
3.3.2 基本功能块对光传送网节点的描述	66
3.3.3 光传送网的原子功能模型	74
3.4 波长变换器	82

4

光传送网的管理

4.1 电信管理网	97
4.1.1 TMN 的结构	98

4.1.2 TMN 的功能	103
4.2 光传送网的管理方案	106
4.2.1 光传送网的分层结构	106
4.2.2 光网络管理的信息模型	108
4.2.3 光传送网管理的特殊要求	109
4.2.4 光传送网管理系统的结构	110
4.3 光传送网的管理需求	112
4.3.1 网元管理层的管理需求	112
4.3.2 网络管理层的管理需求	115
4.4 光传送网的管理网络	118
4.5 光传送网开销信道的实现	121

5

光传送网的优化设计原理

5.1 引言	126
5.2 电路交换型光传送网的 RWA 问题	127
5.2.1 静态 RWA 问题	127
5.2.2 动态 RWA 问题	140
5.3 分组交换型光传送网的最优化虚拓扑问题	141
5.3.1 波分复用单跳和多跳网络	141
5.3.2 物理拓扑和虚拓扑	142
5.3.3 最优化虚拓扑问题的描述	145
5.3.4 优化算法分析	147

6

WDM 光网络中的传输限制

6.1 串扰	150
6.1.1 串扰的产生	150
6.1.2 同频串扰和异频串扰	152
6.1.3 串扰对系统性能影响的研究	154
6.1.4 WDM 光网络中的相干串扰	161
6.2 噪声累积	162
6.2.1 EDFA 的 ASE 噪声以及 EDFA 级连特性	163
6.2.2 波长变换器导致的噪声累积	169
6.3 色散补偿	172
6.4 光纤中的非线性效应	179
6.5 WDM 光网络其他传输限制	186
6.5.1 WDM 环路问题	186
6.5.2 光网络的功率管理	191

7

IP over 光网络

7.1 数据光网络	193
7.2 IP over SDH	198
7.2.1 IP/PPP/HDLC over SDH	198
7.2.2 IP/SDL over SDH	200
7.3 IP over GE	204

7.4	MPLS, MPλS 和 GMPLS	206
7.5	自动交换式光网络	215
7.6	数字包封技术	218
7.7	光因特网示例: CA * net3	222

1

光交换原理与发展

随着人类社会信息化时代的临近，对通信的需求呈现加速增长的趋势。发展迅速的各种新型业务对通信网的带宽和容量提出了更高的要求。通信网的两大主要组成部分——传输和交换——都在不断地发展和革新。

光纤有着巨大的频带资源和优异的传输性能，是实现高速率、大容量传输的最理想的物理媒质。随着波分复用（WDM）技术的成熟，一根光纤中已经能够传输几百吉比特秒到太比特秒的数字信息。传输系统容量的快速增长带来的是对交换系统发展的压力和动力。通信网中交换系统的规模越来越大，运行速率也越来越高，未来的大型交换系统将需要处理总量达几百、上千太比特/秒的信息。但是目前的电子交换和信息处理网络的发展已接近了电子速率的极限。其中所固有的 RC 参数、钟歪、漂移、串话、响应速度慢等缺点限制了交换速率的提高。为了解决电子瓶颈限制问题，研究人员开始在交换系统中引入光子技术，实现光交换。

光交换的优点在于，光信号在通过光交换单元时，不需经过光电、电光转换，因此它不受检测器、调制器等光电器件响应速度的限制，对比特速率和调制方式透明，可以大大提高交换单元的吞吐量。由于光逻辑器件的功能还很简单，不能完成控制部分复杂的逻辑处理功能，因此目前的光交换单元还都要由电信号来控制，即电控光交换。

光信号的分割复用方式有三种：空分、时分和波分，相应也存在空分、时分和波分三种光交换，分别完成空分信道、时分信

道和波分信道的交换。这三种分割复用方式的特点各自不同，其相应交换单元的实现方案和难易程度也不同。若光信号同时采用两种或三种交换方式，则称为复合光交换。

1.1 空分光交换

空间光开关 (space optical switch) 是光交换中最基本的功能开关。它可以直接构成空分光交换单元，也可以与其他功能开关一起构成时分光交换单元和波分光交换单元。空间光开关可以分为光纤型光开关和自由空间型光开关。

基本的光纤型光开关的人端和出端各有两条光纤，可以完成两种连接状态：平行连接和交叉连接。这样的光开关有三种实现方案，如图 1.1.1 所示。

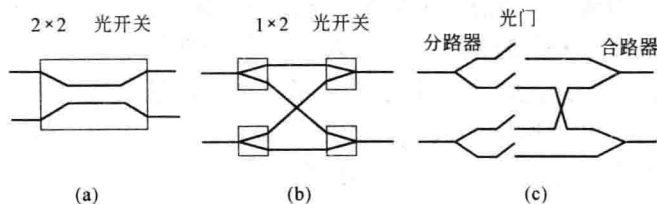


图 1.1.1 2×2 空间光开关的实现方案

(a) 一个 2×2 光开关。如基于 LiNbO_3 的方向耦合器。

(b) 四个 1×2 光开关，用光纤互连起来，如图 (b) 所示。
 1×2 光开关可用 Y 分支型 InP 数字光开关。

(c) 四个 1×2 光耦合器 + 四个门型光开关，其构成如图 (c) 所示。门型光开关可用半导体光放大器或其他类型的门型光开关。

(a) (b) 中的 2×2 和 1×2 光开关属于波导型光开关，都是由外部控制波导的折射率，选择输出波导。折射率控制由外加电压