

“863” 通信高技术丛书

“十一五”

国家重点图书出版规划项目

光交换技术

Optical Switching Technology

□ 余重秀 编著



人民邮电出版社
POSTS & TELECOM PRESS

“863” 通信高技术丛书

“十一五”
国家重点图书出版规划项目

光交换技术

Optical Switching Technology

□ 余重秀 编著

人民邮电出版社

北京

图书在版编目 (CIP) 数据

光交换技术 / 余重秀编著. —北京: 人民邮电出版社,
2008.9

(“863” 通信高技术丛书)

ISBN 978-7-115-17466-6

I. 光… II. 余… III. 光纤通信—通信网 IV. TN929.11

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 001476 号

内 容 提 要

本书系统地介绍了现代通信中的光交换技术, 主要包括通信交换的发展历程、光交换技术涉及的物理机理、关键功能器件、各种光交换方式和系统; 重点介绍光交换中的光波技术、光标记交换、光突发交换、智能光交换等新技术及其关联的全光网络, 并对下一代全光网络中的光交换技术进行展望。

本书可供具有一定通信理论基础的科研人员和工程技术人员阅读, 可作为高等院校、科研院所光通信专业及其相近专业研究生课程的教科书或参考书。

“863” 通信高技术丛书

光交换技术

◆ 编 著 余重秀

责任编辑 陈万寿

◆ 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>

三河市潮河印业有限公司印刷

◆ 开本: 787×1092 1/16

印张: 22.25

字数: 541 千字

2008 年 9 月第 1 版

印数: 1—3 000 册

2008 年 9 月河北第 1 次印刷

ISBN 978-7-115-17466-6/TN

定价: 58.00 元

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

反盗版热线: (010)67171154

“863” 通信高技术丛书

编 委 会

主 任：叶培大

委 员：（按姓氏笔画顺序排列）

卫 国 王志威 王 京 王柏义

韦乐平 尤肖虎 冯记春 朱近康

邬江兴 邬贺铨 孙 玉 纪越峰

杜肤生 李少谦 李世鹤 李红滨

李武强 李 星 李默芳 杨千里

杨 壮 张 凌 陈俊亮 季仲华

周炯槃 郑南宁 赵梓森 赵慧玲

侯自强 姚 彦 郭云飞 曹淑敏

蒋林涛 谢麟振 强小哲 简水生

序

近年来，信息技术正深刻影响全球社会和经济的发展。作为引领信息技术发展的通信技术获得长足进步，并方兴未艾，各种通信新业务随着人类社会信息化时代的不断发展正在迅速增长，并以惊人的速度递增。人们对网络的依赖程度从来没有像今天这样高，一个能够支持多种业务融合、终端用户易于获得、价格低廉的网络，已经成为当前通信领域发展的重要方向和目标。

光纤巨大的频带资源和优异的传输性能，使之成为通信业务高速、大容量传输的理想介质；自 20 世纪 90 年代以来，涌现出的波分复用技术为我们带来了几乎“取之不尽”的物理带宽资源；宽带光放大技术的重大突破以及大量新型光器件的成功研发和应用，使得光纤传输在短短几年时间里发生了翻天覆地的变化，引起了人们的极大兴趣和关注。然而，电处理技术发展的步伐远远不能满足当今发展的需求，电子交换已经成为通信技术发展的瓶颈。光电转换设备也成为降低成本、提高通信质量的主要目标之一。人们呼唤基于光子技术的交换及其设备的到来；期盼早日实现传输和交换的全光化网络。新一代智能化光网络被认为是当今国内外发展最快、最具潜力、最具前景的重要承载平台，必将在未来的通信领域中占据重要的地位和巨大的市场。全光网络的研究和应用正孕育着一场新的革命，并将开创通信工程的新纪元。

全光网络的建立与发展势在必行，世界各国的许多科研机构、通信公司和高等院校都在研究、开发光交换和全光网络产品，并相继开展全光联网的现场试验。我国光交换、全光网络研究和应用在国家“九五”、“十五”“863”计划、“973”计划、自然科学基金和中科院知识创新工程的支持下，得到了跨越式的发展，如我国已完成了大容量智能光交换节点设备研制，在国际上创新性地提出了 ASON 支持链路层组播和突发传送与交换的技术，自主研发的设备已投入“863/3T Net”网络应用。去年，在《国家中长期科学和技术发展规划》中提出要“突破制约信息产业发展的核心技术”；在《信息产业科技发展“十一五”规划和 2020 年中长期规划纲要》中明确规划了“进行全光网研发，重点研究多粒度、大容量光交换节点，突破核心技术……”，这是我国通信领域研究和发展的战略选择，也是引领和支撑我国光交换、全光网络的深入研究和发展的根本保障。今年各科技计划都将这些内容纳入项目指南，正在全面铺开和实施。

正当光交换、全光网络的研究及应用在我国蓬勃发展之时，我欣喜地得知《光交换技术》一书即将问世，这是一件很有意义的事情。国外关于光交换技术方面的专著不多，国内至今也没有系统介绍光交换的书。本书被纳入“十一五”国家重点图书出版规划，并作为“863”通信高技术丛书之一出版。全书从理论到应用、全面地介绍光交换技术的机理、器件、系统和发展，使读者能较快、较准确地理解和把握这门高新技术，它将为我国全光通信网的研究和教学工作发挥很好的作用。

本书作者几十年来一直在教学和科研第一线辛勤耕耘、不断进取、勇于创新。近 10 多年

来作者连续负责、完成了多项国家“863”计划、“973”计划、自然科学基金等项目，取得了显著的科研成果，多次获得过国家和省部级的科学进步奖，在国内外有影响的学术杂志上发表了百余篇论文。作者潜心指导的博士学位论文，自2004年以来连续3年获得校级优秀博士学位论文奖。作者在我校首次开出《光交换技术》课程，历经了6年的教学实践，在教学工作中不断跟踪技术发展前沿，收集第一手资料，并将自己的研究成果和国内外最新的研究进展带进课堂；同时也不断听取教学反馈意见，改进教学内容，使学生受益匪浅，反响很好。这些丰富的教学和科研实践活动，为本书的撰写奠定了坚实的基础。作者作为北邮光电子研究的学术带头人，既要承担繁重的教学和科研工作，又要规划和组织学科的发展，撰写本书花了大量的休息时间，历时数年，以惊人的毅力、认真严谨的学风完成全书，这种精神值得赞赏和发扬。

祝愿《光交换技术》为我国培养与造就光通信工程领域的高素质科技人才，为推动全光网络的研究和发展做出贡献。

叶培大

前 言

通信信号的交换与传输是通信网中两个核心支撑技术。基于光波的通信传输技术早在上世纪 70 年代就走向了应用,并随着通信业务的急剧增长,正在如火如荼地发展。基于光波的通信交换技术目前还很不成熟,需要深入研究适应高速、动态光子交换的新机理、新材料及新器件,需要实施在 IP over WDM 技术驱动下产生的光标记交换,不断改进、完善光路交换和光分组交换两者优势相结合的光突发交换,全面发展 IP 核心技术引入到光交换后产生的智能光交换,进一步开发多种通信业务和光交换方式、系统综合的多粒度光交换等,面临的这些新问题、新技术正是光交换技术的发展方向。当今信息化程度日益加强,通信网络业务的多样性、超大容量等对光交换技术提出了更高要求,全光交换机的诞生及其商用是人类梦寐以求的愿望,世界各国都在为这个目标的实现而努力奋斗。

本人多年来承担国家“863”高技术计划、国家“973”基础研究发展计划、国家自然科学基金等设立的光交换项目,取得了不少成果。在国内外有影响的学术刊物、杂志和国际会议上已发表数十篇有关光交换技术方面论文,并培养了数十名博士生、硕士生。本人在总结多年科研成果的基础上,参考国内外大量资料,并结合丰富的教学实践,完成了本书的编写工作,使之成为国内全面介绍光交换技术的专著。

全书共分 6 章,第 1 章绪论,概括地介绍了现代通信中的光交换技术,从通信交换的发展历程、光交换的产生背景来说明光交换技术是信息社会中通信交换技术发展的必然趋势,简介了光交换研究的基本内容及特点、光交换的研究现状及发展等;第 2 章介绍光交换技术涉及的物理机理,主要包括光学双稳,光折变效应,光放大,多量子阱,自电光效应,光学介质的非线性效应(折射率非线性、光 Kerr 效应、自相位调制、交叉相位调制、四波混频及差频产生),以及光孤子等;第 3 章介绍光交换的关键器件及其分类,包括基于不同机理的光开关、光双稳器件、多量子 SEED 器件、空间光调制器、波长变换器、可调谐光器件等,以及它们的特性;第 4 章介绍各种光交换方式及其机理、特点和相应的系统,涉及到光路交换与光分组交换,包括空分光交换、自由空间光交换、时分光交换、波/频分光交换、ATM 光交换等方式和系统,以及由这些光交换方式组成的复合系统等;第 5 章重点介绍光交换中的光波技术,包括高重复率超短脉冲产生技术、超高速全光开关技术、光波分复用/解复用技术、光分组/信元的编码及地址识别、光分组压缩与解压缩、光缓存技术、光同步与时钟恢复及全光再生技术等八个关键的单元技术;第 6 章介绍光交换技术的新进展,包括光标记交换、光突发交换、智能光交换等新技术及其关联的全光网络、软交换技术,并展望下一代全光网络中的 MPLS、GMPLS 及多粒度光交换技术等。本书系统地介绍了光交换涉及的基本理论、技术、器件,以及它的应用和发展等,希望对读者学习、理解和研究光交换技术提供帮助。

由于种种原因本书的编写经历了较长时间,现在终于完成了。本人衷心地感谢国家“863”高技术计划、国家“973”基础研究发展计划、国家自然科学基金委员会等对光交换研究的多年资助,使本书成为承担这些科研的重要成果之一;感谢新闻出版总署将本书列为“十一五”

国家重点图书出版规划项目·重大工程出版规划。

在此要特别感谢中国科学院资深院士、IEEE 终身会士 (IEEE Life Fellow)、北京邮电大学名誉校长叶培大教授，他对本书的出版十分关心，审阅了全书的架构、撰写了序，并对本书给予了充分肯定。这不仅是对作者的激励，也是对光交换技术发展的期望。

在编写本书的过程中，本人的博士、硕士生们为本书的出版做了大量工作，如郑文潇硕士、于志辉博士、张琦博士、桑新柱博士、王守源博士、陈卓博士、马健新博士、李海军硕士、方冬梅硕士，康步青硕士、胡乐辉硕士、李杰硕士、查一昆硕士等帮助查寻、收集资料，录入文字、作图及校对等，工作琐碎，但不可或缺，在此一并表示感谢！

本书编写花了大量的精力和休息时间，感谢家人的鼎力支持和悉心帮助，使本书如期出版。

书中难免有疏漏和不妥之处，敬请同行和读者不吝赐教。读者可将宝贵意见和建议发至编辑电子邮箱 chenwanshou@ptpress.com.cn。

作 者

目 录

第 1 章 绪论	1	2.6.3 自相位调制	34
1.1 通信交换技术的发展历程	1	2.6.4 交叉相位调制	37
1.2 光交换的产生	3	2.7 非线性光混频	38
1.3 光交换研究的基本内容及特点	6	2.7.1 差频产生及其特性	38
1.4 光交换技术的研究现状	7	2.7.2 四波混频及其特性	39
第 2 章 光交换的物理基础	9	2.8 光孤子	41
2.1 光学双稳	9	2.8.1 光孤子的描述	41
2.1.1 光学双稳现象	9	2.8.2 光孤子的特性	43
2.1.2 光学双稳的分类	10	2.8.3 光孤子的应用简介	46
2.1.3 光学双稳的非线性	14	第 3 章 光交换器件	50
2.2 光折变效应	15	3.1 光交换器件的分类及其性能	
2.2.1 光折变的机理	15	指标	50
2.2.2 光折变效应的特性	17	3.1.1 分类	50
2.2.3 光折变效应的应用		3.1.2 性能指标	51
简介	18	3.2 基于不同机理的光开关	52
2.3 光放大	20	3.2.1 传统的机械光开关	52
2.3.1 光放大的基本性能	20	3.2.2 电光开关	53
2.3.2 半导体光放大	23	3.2.3 热光开关	54
2.3.3 光纤型光放大	24	3.2.4 声光开关	55
2.4 多量子阱	28	3.2.5 全息光开关	56
2.4.1 多量子阱结构	28	3.2.6 MEMS 开关	56
2.4.2 MQW 的特性	28	3.2.7 其他光开关	60
2.4.3 应变量子阱	30	3.3 光双稳器件	61
2.5 自电光效应	30	3.3.1 F-P 腔光触发器	61
2.5.1 量子限制 Stark 效应	30	3.3.2 分支波导光逻辑门	62
2.5.2 自电光效应及其特性	31	3.3.3 定向耦合器光双稳	
2.6 光纤(或介质)的非线性		开关	63
效应	32	3.3.4 半导体光双稳高速	
2.6.1 非线性折射率效应	32	开关	65
2.6.2 光 Kerr 效应	33	3.3.5 光电反馈式光学多稳	
		器件	66

3.4	多量子阱 SEED	67	系统	124
3.4.1	SEE 双稳二极管	67	4.3	自由空间光交换
3.4.2	对称 SEE 逻辑门	68	4.3.1	不同器件构成的
3.4.3	多稳态 SEE 光运算器	70	FSOSN	127
3.4.4	晶体管偏置 SEED	70	4.3.2	典型的自由空间光
3.4.5	SEE 灵巧像素	71	交换系统	133
3.4.6	SEE 波长转换与再生	72	4.4	时分光交换
3.5	空间光调制器	72	4.4.1	时分光交换分类
3.5.1	SLM 及其分类	73	4.4.2	基本结构及特点
3.5.2	磁光 SLM	74	4.4.3	TDOSN 及其主要
3.5.3	液晶光阀	76	功能	142
3.5.4	普克尔斯 SLM	77	4.4.4	时分光交换网络
3.5.5	微通道 SLM	78	4.4.5	典型的 TDOS 系统
3.5.6	表面形变 SLM	78	4.5	波/频分光交换
3.5.7	Si-PLZT 陶瓷 SLM	79	4.5.1	基本结构及特点
3.5.8	数字微镜器件 SLM	80	4.5.2	波长变换的实现技术
3.6	波长变换器	81	4.5.3	波/频分光交换节点
3.6.1	利用 SOA 的 WC	81	4.5.4	典型的 WD/FD-OS
3.6.2	利用 LD 的 WC	83	系统	164
3.6.3	利用 EAM 的 WC	84	4.6	ATM 光交换
3.6.4	利用光纤非线性的 WC	86	4.6.1	ATM 信元及其光交换
3.7	可调谐光器件	87	原理	167
3.7.1	可调谐滤波器	87	4.6.2	ATM 光交换节点
3.7.2	可调谐激光器	92	4.6.3	典型的 ATM 光交换
3.7.3	可调谐波长变换器	98	系统	169
3.7.4	波长可调谐光探测器	102	4.7	光分组交换
3.7.5	可变光衰减器	105	4.7.1	光分组的格式、交换
第 4 章	光交换方式和系统	112	原理及特点	172
4.1	光交换方式	112	4.7.2	OPS 节点及其关键
4.1.1	光路交换与光分组		技术	174
	交换	112	4.7.3	光分组交换的协议
4.1.2	复用光交换方式	113	4.7.4	典型的 OPS 系统
4.2	空分光交换	114	4.8	多维、复合光交换系统
4.2.1	基本结构及特点	115	4.8.1	多维、复合光交换的
4.2.2	空分光交换网络	116	提出	182
4.2.3	不同器件构成的		4.8.2	MOS 方式及系统
	SDOSN	119	分类	182
4.2.4	典型的空分光交换		4.8.3	基于平行背板和总线的
			多维 MOS 系统	185

第5章 光交换中的光波技术190

- 5.1 高重复率超短光脉冲产生技术190
 - 5.1.1 利用增益开关激光器.....190
 - 5.1.2 利用外腔锁模激光器.....190
 - 5.1.3 利用锁模光纤(环)激光器.....191
 - 5.1.4 利用集成电吸收半导体激光器.....192
 - 5.1.5 利用超连续谱激光器.....193
- 5.2 超高速全光开关技术194
 - 5.2.1 无源非线性高速光开关.....194
 - 5.2.2 有源非线性高速光开关.....199
- 5.3 光波分复用/解复用技术202
 - 5.3.1 光波色散型 DeWDM.....203
 - 5.3.2 光波干涉型 DeWDM.....207
 - 5.3.3 光波偏振型 DeWDM.....208
- 5.4 光分组/信元的编码及地址识别213
 - 5.4.1 光分组/信元的几种编码方法.....213
 - 5.4.2 基于不同机制的地址识别技术.....214
- 5.5 光分组压缩与解压缩220
 - 5.5.1 光分组比特的压缩.....220
 - 5.5.2 光分组比特的解压缩.....220
 - 5.5.3 三种压缩与解压缩技术的应用.....221
- 5.6 光缓存技术.....226
 - 5.6.1 利用 FDL 的光缓存方式.....226
 - 5.6.2 不同的光缓存器技术.....227
 - 5.6.3 光存储研究新方案.....231
- 5.7 光的同步与时钟恢复236
 - 5.7.1 时延抖动的产生.....236
 - 5.7.2 光同步措施.....237

- 5.7.3 光时钟提取(或恢复)的实现技术.....237

- 5.7.4 相位对准光同步技术.....245

5.8 全光再生技术.....246

- 5.8.1 光信号再生及其关键技术.....246
- 5.8.2 全光 2R 技术研究.....247
- 5.8.3 全光 3R 技术研究.....249

第6章 光交换技术的新进展及展望.....255

- 6.1 光标记交换技术.....255
 - 6.1.1 光标记交换的产生.....255
 - 6.1.2 光标记技术.....257
 - 6.1.3 OLSP 与光子 IP 路由器.....260
 - 6.1.4 典型的光标记交换系统.....263
- 6.2 光突发交换.....268
 - 6.2.1 基本原理及特点.....268
 - 6.2.2 帧结构与偏置时延.....269
 - 6.2.3 体系结构及实现技术.....271
 - 6.2.4 OBS 的控制协议.....275
 - 6.2.5 波长路由 OBS 系统.....278
 - 6.2.6 基于环网的 OBS 系统.....281
- 6.3 全光网络中的光交换技术应用.....285
 - 6.3.1 美国的 ARPA 计划和 NGI 计划.....285
 - 6.3.2 欧洲的 RACE 计划和 e-Europe 计划.....289
 - 6.3.3 日本的高速宽带光网络研究.....291
 - 6.3.4 中国的光网络研究与发展.....294
- 6.4 智能光交换.....298
 - 6.4.1 体系结构及特点.....298
 - 6.4.2 ASON 的核心技术.....301
 - 6.4.3 相关协议与标准.....310
 - 6.4.4 ASON 试验平台.....312

6.5 软交换技术.....	316	多粒度光交换.....	321
6.5.1 软交换的产生.....	316	6.6.1 MPLS 与波长路由器...	321
6.5.2 体系结构及设备.....	317	6.6.2 GMPLS 技术.....	325
6.5.3 主要功能及技术规范.....	318	6.6.3 多粒度光交换技术.....	326
6.5.4 软交换的应用及发展.....	320		
6.6 NGN 中的 MPLS、GMPLS 及		参考文献.....	330

第1章 绪 论

上世纪 60 年代,激光器的诞生开创了人类的激光技术时代,相继出现了许多新兴的研究方向和领域,通信中的光交换技术就是在 20 世纪 70 年代初被提出的新研究课题。利用光波的优势和特点,借鉴电交换技术的发展经验,使光交换技术的研究不断地向前推进,在随后的几十年中,光波技术及光电或光器件的形成机理和实现技术上的每一次突破,都推动了光交换技术的进一步发展,至今已形成了种类繁多的光交换器件、光交换机制、实现方法及系统等。

人类社会进入多媒体信息时代以来,大量的话音、数据、图像信息需要传输、交换和处理,需要提供 Tbit/s 的传输速率、Tbit/s 的交换速率和 Tbit 的信息存储能力,这是电子技术无法做到的事情。光子技术在 Tbit/s 量级的传输、交换和存储上显示出电交换无法比拟的优势,充分利用光子技术建立全光传输/交换网的要求被提出来,国际电联 ITU-T 特别规定:在全光网中,增加光层上实现路由交换及其智能化的功能等。于是,光交换技术在这些需求的驱动下,得以快速发展。在全世界范围内,大量的通信研究机构 and 高校致力于高速光交换器件、宽带交换技术、灵活高速的路由控制等技术的研发;在国际主流的光通信期刊上、每年的国际光通信学术会议及产品交流会议上,均有大量的光交换技术研究成果和应用产品报道;全光试验网在全球纷纷建立,光交换技术正在适应新时代的发展需求,而不断地发展成熟并被广泛应用。

本章概述光交换技术,从通信交换技术的发展历程、光交换的产生背景来说明光交换技术是信息社会中通信交换技术发展的必然趋势,并简介光交换研究的基本内容及特点、发展现状等,说明光交换技术在通信交换技术及其系统中的重要作用及发展潜力。

1.1 通信交换技术的发展历程

通信交换技术经历了漫长的发展历程,它随着通信技术及系统的变革换代而向前推进。通信网中的核心技术发展分为模拟技术、基于 TDM 电路交换的数字技术、基于统计复用分组交换的数字技术等阶段,图 1.1 示出了通信交换的业务、设备、控制信令及其硬件等的演进过程。图中最上行表示通信交换技术从人工交换(图中省略)→步进制(Step-by-Step)交换→纵横制(Crossbar)交换→空分电交换 ESS(SD)→时分电交换 ESS(TD)→基于程序控制的智能电交换 ESS(IN);上行圆柱形符号内第 1、2 行分别表示通信交换设备及其控制信号的更新换代,右边的两个箭头分别表示通信交换设备向着高吞吐量、控制信号向着高智能化的方向发展;下行圆柱形符号表示交换信令信号的变化,右边的箭头表示信令信号按扩大通信业务能力的要求正在向前发展;图中间一行表示由不同的通信交换技术和设备承载的通信业务不同类型。对这个图的进一步说明见下文。

美国人贝尔在 1876 年发明了电话机。两年后,世界上第一个基于人工交换方式的电话交换局在美国 New Haven 建立起来,构成为电信交换的开端。随着人类社会的进步、工业和科技的发展,通信交换技术也逐步发展。1892 年诞生了步进式交换机,它基于机械自动化

技术，通过拨号电脉冲（EP）驱动转子开关，连接主叫方与被叫方，实现主、被叫方之间的通信。但这种交换机的路由灵活性较差，容量增加导致线路阻塞率上升。解决这些问题的办法是将话音信号与其控制信号分开，以有线—逻辑（Wired Logic）转换回路进行集中控制，并在信令回路中采用多频（MF）码信令信号，于是产生了纵横式交换机。利用这种交换机，于 1926 年在瑞典实现了电空分交换 ESS（SD）。在随后的 40 年里，电信业务的种类相对简单，传输、交换的通信信号均是模拟电信号，采用了以频分复用、模拟载波调制为技术基础的模拟传输设备，信号的步进、纵横式交换也在模拟交换设备中完成，即整个通信技术处于模拟通信阶段。在这个阶段，模拟信号处理技术贯穿在传输、交换的全程/全网中，采用面向连接方式，为每一对通话用户提供独立的资源（交换触点或频段），以保证通信业务的服务质量。

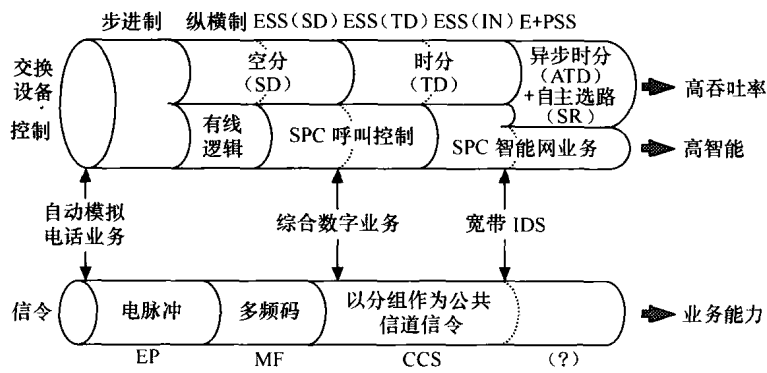


图 1.1 通信交换技术的发展历程

上世纪 60 年代，电子/半导体技术、计算机技术大发展，带来了通信交换技术的新纪元——在交换机中引入计算机软件，产生了程（序）控（制）交换机。1965 年，美国、日本成功地开通了程控交换机，他们以存储的程序控制（SPC）进行呼叫控制、建立公用信道信令系统，其交换设备仍基于机械技术。这种交换控制技术的进步使程控交换机很快地用于世界上其他国家。70 年代数字技术、半导体集成工艺的发展又推动了全电子式交换系统的产生，实现了数字信号的传输和交换的匹配，交换设备也由机械空分型向时分复用（TDM）型发展。法国首先研制出世界上第一台数字式程控时分电交换 ESS（TD）机，接着意大利、美国、日本、英国等也有了自己的数字程控交换机系列，并在交换机的容量、交换速率及性能上有不同的改进和提高。在这个阶段，传输和交换的设备采用了基于 TDM 电路交换的数字通信技术，承载面向连接的业务，为每一对通话用户提供独立的（一个或多个时隙）连接资源，以保证通信质量；但其终端设备由于经济上的原因，仍为模拟工作方式。于是，通信交换技术逐渐从模拟技术向数字技术过渡，到 70 年代末，以 TDM 电路交换为基础的数字技术在通信网中占据了主导地位。

现代通信业务量猛增，从话音、电报到文字、数据、静态或活动的图像、高清晰度电视等多媒体通信，大量信息的传输与交换是以承担电话交换业务而建立的公用电话交换网（PSTN）难以胜任的，相应地产生了电路/分组交换数据网、广播电视网等，并以 SPC 实现简单的智能业务，以分组作为公共信道信令（CCS）。不断发展的数据通信技术促进了干线数字化、市话中继数字化等，而对不同特性和传输速率的通信业务还需要解决接入数字化、终端

设备数字化,于是建立综合业务数据网(ISDN)的要求被提出来,接着在许多国家建立起 ISDN 的实验模型。ISDN 对各种业务提供标准的网络接口,实现端到端的数字连接,进行空分/时分交换,其传输、交换速率达到 64kbit/s~2Mbit/s 等。在这个阶段,铜线的基本接入速率没有数量级的提高,终端设备成本受到专用芯片的限制,ISDN 并没有达到综合所有业务的目的。人们又开始研究宽带(B)-ISDN,以异步转移模式(ATM)作为 B-ISDN 的信息传输方式,进行分组交换,将电路交换中面向连接的信令技术与分组交换中的存储转发、自主选路(SR)等技术结合起来,实现窄/宽带业务、实时/非实时业务的综合。ATM 技术的确提高了通信系统的性能,但又带来信令和控制的复杂、终端设备昂贵等问题。光纤通信技术的发展为通信交换带来了新的契机,特别是密集波分复用(DWDM)技术的出现,使通信网获得了丰富且低成本的传输资源,再利用复杂、昂贵的 ATM 交换机显然是得不偿失的。20 世纪 90 年代中期,IP 技术作为分组交换技术的另一个重要分支而产生,它定位于支持非实时数据业务,并采用非面向连接的工作方式,无需信令建立通信业务的端到端连接,这就大大简化了节点设备的复杂度,但 IP 技术面临着 QoS、管理、安全性等问题。经过十多年的发展,IP 技术已在数据承载网和专线网业务中实现,而在电话网中,目前仍是 TDM 电话占统治地位,完全的 IP 化还有待于进一步的努力。人们至今认识到:IP 网最初的设计理念就是以用户为核心、以用户自律为基础,而网络运营者不负责网络安全和业务盈利,这个理念本身就限制了 IP 技术的广泛应用。因此,需要按电信网的服务要求和标准从根本上改造 IP 网,实现真正基于 IP 分组的通信数字化传输与交换技术。

从上世纪 80 年代至今,通信交换技术的发展进程缓慢,一度曾认为 ATM 技术是发展主流,后又认为基于 IP 分组的数字技术是下一代网络的核心。当前基于 TDM 电路交换的数字技术与基于分组交换的数字技术并存发展,各有利弊,各有用武之处;通信交换网也种类繁多,各自独立发展。从理论上讲,IP 分组交换技术能够综合窄/宽带业务、实时/非实时业务等,是实现通信业务综合的最佳技术;IP 技术采用非面向连接方式,简化了信令和节点设备的复杂度,它目前存在的 QoS、安全性等问题将逐步得到解决,基于 IP 分组的数字技术终究要成为下一代网络的核心技术;而通信业务的容量、传输/交换速率、吞吐量的进一步提高,通信设备的自动化、信令控制技术的高智能化的实现,以及通信新业务的开拓……这一连串问题的解决成为通信交换技术发展的主攻方向。

20 世纪 60 年代初激光的产生,使人们看到光波的宽带、高速传输、并行处理等优点;70 年代至今光波技术在光纤通信传输中的成功应用,又促使人们在 70 年代初就提出光波技术用于通信交换的设想,并广泛研究了光交换的机理、实现方案、材料、硬软件技术等。在这个过程中,虽然遇到不少困难,但人们坚信光波技术的优势必将带来通信交换的新面貌,并一直在努力地研究、发展光交换技术,人们还憧憬在 21 世纪初研制出新一代的光交换机。因此可以说光交换技术从 70 年代初就成为通信交换技术发展的重要内容,它的每一个重大研究进展直至光交换机的诞生都将成为通信交换技术发展中的重要里程碑。

1.2 光交换的产生

利用光波的宽带、高速传播、可并行处理、抗干扰性强等特点,以光波作为通信信息的载体,将光波技术引入到通信交换系统中,对光信号进行交换,实现交换回路及其控制回路

的全光化，以提高光交换性能和通信质量等，这就是通信光交换的简单概念。但是通信光交换的提出并不是偶然的，它受到如图 1.2 所示的几方面因素的影响，即光纤通信传输技术的成功发展，电信业务市场及电信网络的发展需求和电信交换面临的问题，先进的光电子器件及技术发展和光计算技术的进展，以及因特网的产生和应用市场等引发和推动了光交换的产生和发展。

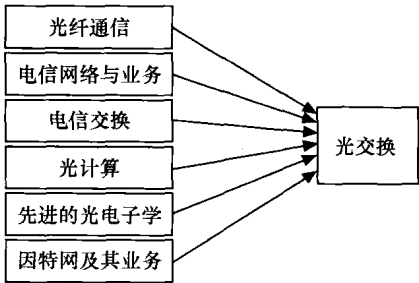


图 1.2 影响光交换产生和发展的因素

光纤通信以光波作为通信信号的载波、光纤作为传输介质，应用各种光波技术，在通信领域得到了成功的发展。光纤通信系统的发展若以工作波长划分，经历了三代，它们分别是工作波长为 $0.85\mu\text{m}$ 的多模光纤系统，工作波长为 $1.3\mu\text{m}$ 的多模/单模光纤通信系统和工作波长为 $1.55\mu\text{m}$ 的单模光纤通信系统。光纤通信系统中使用的光源经历了从半导体发光二极管（LED）到激光二极管（LD）的进步，还产生了光纤激光器等。LED 是非相干光源，具有输出功率较大的面发光、线性度较好的边发光、温度敏感性较强的超辐射发光等结构，它们分别用于中/低速、短距离通信系统；LD 是相干光源，也有多种结构，如法布里—珀罗（F-P）型、分布反馈（DFB）型、分布 Bragg 反射（DBR）型、量子阱（QW）型和垂直腔面发射型等，它们分别形成多/单纵模、动态单模、波长可调谐、高速率、低阈值、大功率等 LD，并用于中/高速、长距离的光纤通信及有线电视（CATV）等系统；光纤激光器有稀土掺杂、基于光纤非线性效应，利用单晶/塑料光纤和光纤孤子等不同类型，它们用于提高、改善光纤通信系统的性能和产生新的光波技术。光信号的直接调制速率从几十 Mbit/s 逐渐提高到目前的 10Gbit/s，乃至更高（实验室研究水平为 160Gbit/s）；光放大器引入光纤通信系统，对光信号直接进行放大，增加了传输距离，同时省掉了光/电/光转换的中继器，因而提高通信质量，降低了系统成本；光波的复用/解复用技术包括空分/时分/波分/频分等，它们又带来光纤通信系统容量的大大提高，最高容量达到 10.92Tbit/s（ $273\times 40\text{Gbit/s}$ ）；应用各种非零色散光纤、大有效面积光纤、低色散斜率光纤和反色散光纤等，研究并克服光纤的非线性，进一步改善了光信号的质量。总之，这些光波技术的应用实现了高速、大容量、长距离的光信号传输。光纤传输技术和光传输网络的成功应用启发人们考虑如何将这些光波技术也引入到通信交换网络中，使通信交换技术也呈现崭新的面貌。

从上世纪 90 年代中后期至今，人类逐步进入到多媒体生活时代，人们的生活内容和方式发生了巨大变化，需要获取各种多媒体信息，包括话音、各种数据信息、静止或动态的图像信息，需要观看高清晰度电视、参加双向广播电视会议、点播不同频道的电视节目、在因特网上进行远程医疗、教育和电子商务活动等，其中非话音业务需要有专门的网络（如计算机网、电视网、分组交换数据通信网等）来承载，需要解决这些专用网络的接口标准化、终端设备兼容以及网管复杂性问题。为了满足这些要求，由 PSTN 逐步演变而成的 ISDN 和 B-ISDN 被提出并建立起来；为承载上述各种宽带、多媒体业务，要求交换节点的容量达到 Tbit/s 量级，这对于高交换容量（160Gbit/s）的电 ATM 交换也是无法实现的，唯一的办法就是利用光的宽带性，即将这些宽带业务以光波作为载波，直接传输、交换光信号；于是，光交换在这样的电信业务需求下，被提到日程上来，它成为通信交换技术发展的必然趋势。

在通信交换网络中，为适应多媒体通信的要求，相应地增加了交换节点、扩展了交换机

的功能（如提供数字业务接口，扩展信令功能，扩展不同类型业务的连接及其呼叫处理/分组处理功能等），其控制程序也越来越庞大、复杂，这就导致交换机的运行速度减慢。这些问题显然是 ISDN 通信的障碍，需要寻找新的解决方法。采用光信号交换是否能解决上述问题呢？这正是我们需要探索的。

上世纪 60 年代末期，半导体材料和器件的研究有了新突破：以分子束外延技术制作出异质结半导体材料，并通过人工改性形成量子阱、超晶格微结构材料。这些材料具有特殊的电学、光学性质，利用它们相继研制出极低阈值、极低功耗、极窄线宽的激光器（LD），以及极高响应速度、极高量子效率的光双稳开关、光探测器（PD）等；介质光栅分布反馈（DFB）和布拉格反射（DBR）结构引入激光器、光电探测器等中，实现了器件的窄带、高速响应、波长可调谐性；垂直腔面发射半导体激光器实现了极低功耗、高耦合效率、高密度的光源面阵集成。由这些优异的功能器件又组成了光电子或光子集成回路，有 LD+PD、LD+MD（调制器）、LD+OA（光放大器）、PD+WG（波导光栅）、PD+AP（雪崩二极管）等，还有基于光波导的高速率、低损耗 AWG 波分复用/解复用器，基于微机械—电—光一体化的 MEMS（Micro-Electro-optic-Mechanical-System）等开关阵列、光探测器，基于能带工程的微结构光子晶体光纤波长变换器、开关等。这些新型的光电子、光子器件是光纤通信、光交换不可缺少的功能器件，它们带来了光纤通信的更新换代和高速发展，同样也为光交换技术提供了发展机遇。

光计算这一课题在上世纪 60 年代末期曾为国内外科技人员密切关注，并展开了光学算法、实现方案及系统结构等方面的研究。激光、相干光系统、傅里叶光学及其信息处理技术等支撑光学模拟计算首先发展起来，相继研究、实现了光学信号和光学图像的代数运算、卷积、相关、傅里叶变换等高速、并行运算；光学非线性逻辑器件和光互连技术又支撑了光学数字计算的发展：场效应晶体管—自电光效应器件用于电控取阈运算，实现了 2 048 位“与”、“或”、“非”等逻辑运算，且运算速度达到万次/秒；由液晶空间光调制器、全息光学元件等组成光电混合神经网络处理器，实现了可重构、可编程矩阵/向量逻辑乘、取阈寻址等运算，先后产生了高速（达到 10^{14} 次/秒）运行、具有多种运算功能的三代数字处理器。北欧八所大学十几年前联合研制了世界上第一台光计算机原型机，随后美国、日本等国家不断报道了光计算研究新成果。光计算中的信息存储问题也在逐步解决，产生了信息不可擦除、可擦除存储的机制和材料，并有了实用的光盘产品。光计算领域的这些研究成果和进展及时地被借鉴到光交换技术的发展中。

因特网于上世纪 80 年代首先在美国产生，最初由 4 台计算机构成一个军用网，它最初的目标仅是在网络某部分受到破坏时，仍能进行计算机联网实验。利用传输控制协议（TCP）和网间网协议（IP），实现了多个计算机和多个网络的互联；采用统一、有效的地址模式，使被联网的每一个子网络均有自己唯一、确定的地址，以便识别时不会混乱，这些措施促成了真正的因特网诞生。美国政府于 1986 年资助、建立了第一个 Internet 骨干网——国家科学基金网络（NSFnet），并将它对公众开放，把美国大学和科研机构的计算机都互联起来，为网络用户提供在线的电子信息。随后因特网连接计算机的数目迅速增长，向美国以外的地区和国家扩展，到 90 年代初已达到 30 余万台。1995 年我国建立了“中国公用计算机互联网（CHINA-NET）”，这个网络与国际因特网接轨。因特网作为一个开放式系统，通过节点将 100 多个国家的校园网、企业网，甚至国家网连接起来，成为名副其实的国际网络。因特网与 PSTN、数据通信网（DCN）互联，为用户提供先进、全面、充实、资源丰富的信息服务。