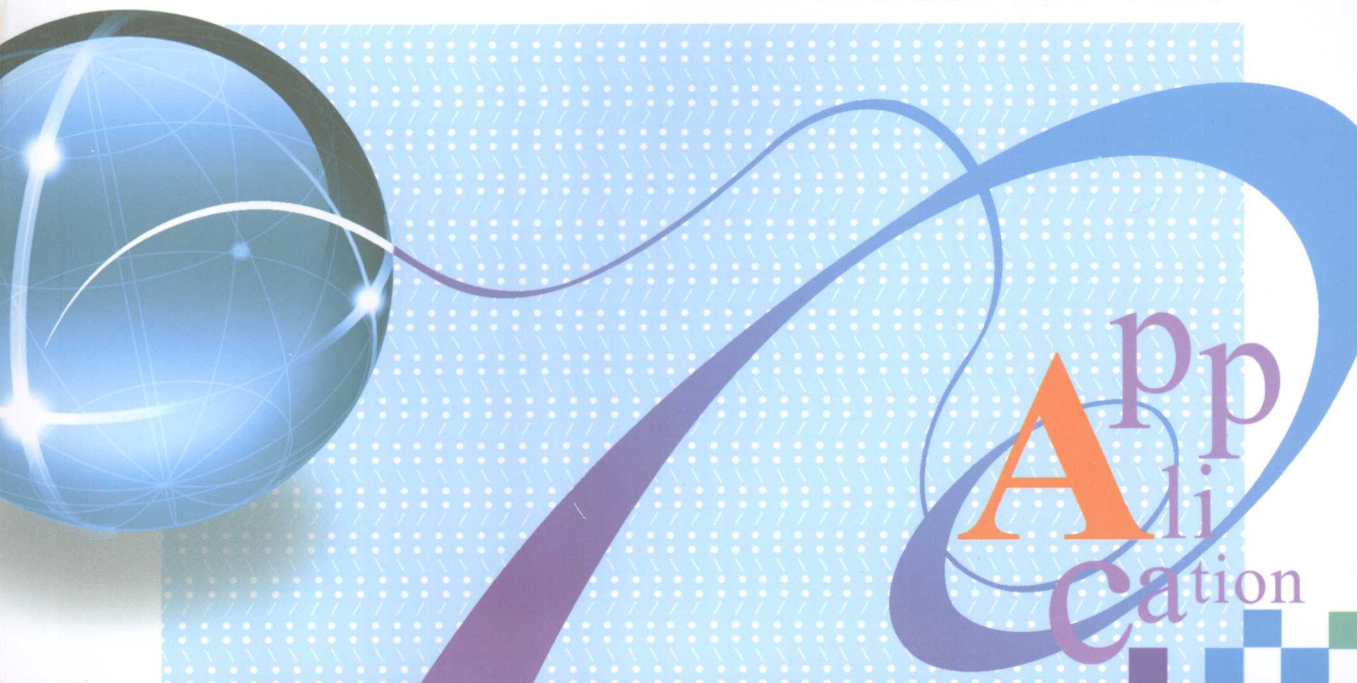


► 21世纪通信网络技术丛书



网络通信与工程应用系列

构建高速通信 光网络关键技术

胡先志 编著



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>

21 世纪通信网络技术丛书
——网络通信与工程应用系列

构建高速通信光网络关键技术

胡先志 编著

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 • BEIJING

内 容 简 介

本书系统而全面地介绍了构建高速通信光网络的关键技术, 主要内容包括光纤特点、光波导理论、光器件、光纤通信系统和光网络组件等光纤通信关键技术, 以及长途干线光网络、城域光网络、自动交换光网络和接入光网络等光网络的实现方法。

本书内容新颖, 书中所介绍的光纤、光器件、光传送网、波分复用系统和光网络等技术内容都是取材于国内外光纤通信领域中的最新研究成果; 特色突出, 书中既简单阐述了光纤通信的基本概念、基本原理和关键技术, 又详细介绍了由我国自主研制的世界第一个 80×40 Gb/s DWDM 系统在光网络工程应用的设计思想、关键技术与工程测试结果, 以突出理论与实际相结合的特色。

本书既可供从事光纤通信领域的科研、设计、生产、施工和维护等方面的技术人员作为参考书使用, 也可以作为高等院校通信类专业的本科生和研究生的专业课教材。

未经许可, 不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有, 侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

构建高速通信光网络关键技术 / 胡先志编著. —北京: 电子工业出版社, 2008.4

(网络通信与工程应用系列)

ISBN 978-7-121-06160-8

I. 构… II. 胡… III. 高速度—光纤通信—通信网 IV. TN929.11

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 029537 号

责任编辑: 王春宁 田宏峰

印 刷: 北京市通州大中印刷厂

装 订: 三河市鹏成印业有限公司

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本: 787×1092 1/16 印张: 24.5 字数: 624 千字

印 次: 2008 年 4 月第 1 次印刷

印 数: 4 000 册 定价: 49.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题, 请向购买书店调换。若书店售缺, 请与本社发行部联系, 联系及邮购电话: (010) 88254888。

质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线: (010) 88258888。

出版说明

通信网络技术是当今发展最快、应用最广和最前沿的通信领域之一。通信技术发展到今天,已经不是传统意义上的充满神秘色彩的深奥技术了,它已经与日常的应用密不可分。可以说,网络的出现,使通信技术得以有了广阔的用武之地。正是由于有了固定电话网、移动通信网和 Internet 网,使通信技术的应用在这些平台上有了用武之地,渗透到了我们日常生活的方方面面。

为了促进和推动我国通信产业的发展,电子工业出版社通信分社特策划了一套《**21 世纪通信网络技术丛书**》。这套丛书根据不同的层面,又细分为三个系列:**<移动通信前沿技术系列>**、**<3GPP LTE 无线通信新技术系列>**和**<网络通信与工程应用系列>**。

· **<移动通信前沿技术系列>**是从移动通信技术(3G 技术)的应用现状与发展情况出发,全面介绍当今移动通信领域涉及的关键技术与热点技术,例如:软件无线电;移动 IP 技术;移动数据通信;WCDMA;TD—SCDMA;cdma2000 移动通信系统网络规划与优化;智能天线技术;认知无线电技术;WiMAX, WiFi, ZigBee 宽带无线接入技术;UWB 技术;UMTS 技术;Ad Hoc 技术等。

<3GPP LTE 无线通信新技术系列>是以 3GPP 中 LTE 标准的关键技术在无线、宽带、高速、资源的有效管理和利用,以及在 B3G/4G 无线通信领域的应用为主。LTE 作为 3G 技术的一个重要的长期演进计划,代表了国际无线通信领域的最新发展需求和解决方案,例如:基于 OFDM 的上、下行(HSxPA)的多址接入技术、随机接入技术、多天线 MIMO 技术、多链路自适应技术、多播技术、功率控制技术、宽带无线网络的安全性、可移动性、可管理性;高效信源与信道编码和调制 MQAM 技术等。

<网络通信与工程应用系列>是以技术为先导,以构建网络的体系结构、标准、协议为目标所开展的对现代无线、移动、宽带通信网络的规划与优化,以及结合工程应用的方向所提出来的。例如:无线网状网、WLAN、无线传感器网络、B3G/4G 通信网工程设计与优化、卫星移动通信网、三网融合技术、网络新安全技术与策略、RFID 应用网络、下一代基于 SIP 的统一通信、光网络与光通信等。

本套丛书依托各高等院校在通信领域从事科研、教学、工程、管理的具有丰富的理论与实践经验的专家、教授;各研究院所的研究员;国内有一定规模和研发实力的科技公司的研发人员,以及国外知名研究实验室的专家、学者等组成编写和翻译队伍,力求实现内容的先进性、实用性和系统性;力求内容组织循序渐进、深入浅出、理论阐述概念清晰、层次分明、经典实例源于实践;力求很强的可读性和可操作性。

本套丛书的主要读者对象是广大从事通信网络技术工作的各科研院所和公司的广大工程技术人员;各高等院校的专业教师和研究生;刚走上工作岗位的大学毕业生;以及与此相关的其他学科的技术人员阅读和参考。

本套丛书从 2008 年上半年开始将陆续推出,希望广大读者能关注它,多对本套丛书提出宝贵意见与建议,欢迎通过电子邮箱 wchn@phei.com.cn 进行探讨、交流和指正,以便今后为广大读者奉献更多、更好的优秀通信技术类图书。

电子工业出版社
通信分社

前 言

光纤、光纤放大器、波分复用、色散补偿、光波长交叉连接、自动光交换等光纤通信关键技术的诞生，推动了光网络由高速率、大容量、远距离长途干线向着大容量、多业务、自动交换和光网络的智能化的方向发展。2007 年 10 月，在德国召开的欧洲光通信会议报道的实验最大传输容量的世界记录是 12.8 Tb/s (160×80 Gb/s)，实现了传输距离为 2250 km。新光纤、新器件和新传输系统等新的光纤通信技术不断问世，必将使得光纤通信发生一场又一场的新的革命，其主要标志是长途干线光网络正在朝着通信超长距离、超大容量、超高速率的方向发展，在 2006 年已实现 100 Tb/s 的传输容量。针对城市中的多业务、多速率和大容量的宽带数据传输特点，接入光网络则是力求使宽带业务能够以价格便宜、接入快捷方式引入到家庭和桌面，真正实现光纤到家庭和桌面。

今天，由各种通信终端设备与光网络共同构成的信息产业实体日益普及和迅猛发展，极大地刺激了用户对语音、数据、图像等综合业务的发展。正是人们对综合业务信息需求量的与日俱增，从而推进长途干线光网络、城域光网络、接入光网络的网络光缆链路的建立和互连，力求在完成人们对各种信息的需求的同时，还能够通过智能化的管理方式来确保用户服务质量和网络的安全性能。

长途干线光网络、城域光网络和接入光网络的星罗棋布，促进了光纤通信产业的进一步腾飞。随之而来的是光纤的品种更新、光器件功能增多、系统设备的多样化、网络分工细化和光网络逐渐进入智能化的发展，从而使得光纤通信技术的应用场所越来越广泛，光网络规模越来越大，光网络的拓扑之间的互连互通智能化程度越来越高。

面对 21 世纪光纤通信产业所逢盛世，如何借助科学方法，使读者早日了解光纤通信关键技术与光网络实现方法，积极投身于光纤通信领域中的具体研究、设计和维护等工作，这就是作者编写本书的目的。为了使广大读者能够及时掌握国际光纤通信和光网络技术的发展动态，作者编写了这本内容新颖、重点突出、实用性强的光网络的关键技术专著，以满足国内从事光纤通信技术科研、设计和生产人员的工作需要。

本书作者以自己多年从事光纤通信研究工作的亲身经验，同时在阅读了介绍光纤通信技术领域中的最新成果的书刊文献的基础上，再总结自己多年从事光纤通信研究和教学工作实践经验，结合我国的具体国情，编著此书。力求做到内容新颖、技术先进、实用方便。

作者在本书中引用了赵梓森院士、韦乐平教授、顾畹仪教授等众多专家的研究成果。在此，作者向他们表示感谢。同时，本书也参考了一些最新出版的图书、期刊和国内外最新标准，从而使本书的内容能够充分反映出光纤通信技术及其工程应用的当今水平。

在本书编写过程中，电子工业出版社通信分社责任编辑王春宁博士在提纲的制定、结构的安排和内容的取舍等方面提出了许多具体指导意见，使本书的内容更加丰富、重点更加突出和更具其特色。在此，作者向他表示诚挚的感谢。

由于本书涉及光纤通信的基本理论、关键技术及光网络工程应用等各个方面的关键技术问题，书中内容广泛且技术新颖，加之作者专业水平有限，书中难免出现一些谬误和不足，恳请读者批评指正。

编著者

2007 年 12 月 1 日

目 录

第 1 章 概论	(1)
1.1 光纤通信技术发展简史	(1)
1.1.1 光纤通信概念	(1)
1.1.2 技术发展简史	(1)
1.2 当今的技术水平	(6)
参考文献	(7)
第 2 章 光纤设计	(9)
2.1 光纤结构与特点	(9)
2.1.1 光纤结构	(9)
2.1.2 光纤特点	(10)
2.2 光纤的光传输理论	(12)
2.2.1 几何光学传输理论	(12)
2.2.2 电磁场传输理论	(13)
2.3 光纤设计	(15)
2.3.1 设计原则	(15)
2.3.2 设计基础理论	(16)
参考文献	(25)
第 3 章 各种通信光纤	(26)
3.1 多模光纤	(26)
3.1.1 结构	(26)
3.1.2 分类	(26)
3.2 单模光纤	(28)
3.2.1 结构	(28)
3.2.2 分类	(29)
3.3 特种光纤	(41)
3.3.1 色散补偿光纤	(41)
3.3.2 掺杂稀土元素光纤	(43)
3.4 塑料光纤	(44)
参考文献	(46)
第 4 章 光纤的传输性能	(47)
4.1 衰减	(47)
4.1.1 作用	(47)
4.1.2 定义	(47)
4.1.3 衰减谱	(47)
4.1.4 衰减机理	(48)

4.2	偏振模色散	(52)
4.2.1	作用	(52)
4.2.2	偏振模色散系数	(53)
4.3	非线性效应	(55)
4.3.1	作用	(55)
4.3.2	受激散射	(55)
4.3.3	非线性相位调制	(58)
4.3.4	四波混频	(61)
	参考文献	(63)
第 5 章	光发射机	(64)
5.1	激光基本概念	(64)
5.1.1	光发射机作用	(64)
5.1.2	激光基本概念	(65)
5.2	发光二极管	(69)
5.2.1	结构	(69)
5.2.2	工作特性	(71)
5.2.3	选用	(74)
5.3	激光器	(74)
5.3.1	结构	(74)
5.3.2	工作特性	(80)
5.3.3	选用	(83)
5.4	光发射机	(84)
	参考文献	(87)
第 6 章	光接收机	(88)
6.1	基本概念	(88)
6.1.1	光接收机的作用	(88)
6.1.2	光电检测器基本概念	(88)
6.2	常用的光电检测器	(90)
6.3	PIN 光电二极管	(91)
6.3.1	结构	(91)
6.3.2	工作特性	(93)
6.4	雪崩光电二极管	(93)
6.4.1	结构	(93)
6.4.2	工作特性	(95)
6.5	其他类型光电检测器	(95)
6.6	光电检测器的工作特性	(96)
6.7	光接收机	(101)
6.7.1	接收机组成	(101)
6.7.2	接收机性能	(102)
	参考文献	(106)

第 7 章 光放大器	(107)
7.1 作用	(107)
7.2 分类	(108)
7.3 工作波段	(109)
7.4 基本概念	(110)
7.4.1 功率放大	(110)
7.4.2 增益饱和	(111)
7.4.3 放大器噪声	(111)
7.5 光放大器类型	(112)
7.5.1 掺铒光纤放大器	(112)
7.5.2 拉曼光纤放大器	(123)
7.5.3 半导体激光放大器	(128)
7.6 光放大器的性能比较	(131)
参考文献	(133)
第 8 章 同步数字传输网	(135)
8.1 SDH 概念和特点	(135)
8.1.1 SDH 产生背景	(135)
8.1.2 SDH 概念及特点	(135)
8.2 SDH 速率与帧结构	(136)
8.2.1 SDH 速率	(136)
8.2.2 SDH 的帧结构	(137)
8.3 段开销	(139)
8.3.1 功能	(139)
8.3.2 位置	(139)
8.3.3 段开销功能	(139)
8.4 复用与映射	(142)
8.4.1 复用原理	(142)
8.4.2 基本复用单元	(144)
8.4.3 映射结构	(147)
8.4.4 高阶通道开销	(147)
8.4.5 低阶通道开销	(149)
8.4.6 指针调整	(149)
8.4.7 2000 版 ITU-T G.707 建议的新内容	(151)
8.4.8 虚容器级联	(153)
8.4.9 同步复用	(158)
8.5 SDH 组网	(158)
8.5.1 基本网元	(158)
8.5.2 段与通道	(161)
8.5.3 基本拓扑结构	(161)
8.6 SDH 保护与恢复	(163)

8.6.1	保护和恢复概念	(163)
8.6.2	保护和恢复分类	(163)
8.6.3	自愈网	(163)
8.6.4	线路保护倒换	(164)
8.6.5	自愈环保护	(165)
8.6.6	双节点互通业务保护	(168)
8.7	业务恢复时间和 SDH 超长保护环	(170)
8.8	传输网主要性能指标	(171)
8.8.1	误码	(171)
8.8.2	抖动	(172)
8.8.3	漂移	(174)
8.8.4	可用性	(174)
8.9	SDH 技术应用与发展	(174)
8.9.1	SDH 技术应用	(174)
8.9.2	SDH 技术发展	(176)
	参考文献	(182)

第 9 章 光网络组网器件

9.1	作用	(183)
9.2	基本性能	(184)
9.3	光连接器	(185)
9.3.1	作用	(185)
9.3.2	工作原理	(186)
9.4	光衰减器	(190)
9.4.1	作用	(190)
9.4.2	工作原理	(190)
9.5	光隔离器	(192)
9.5.1	作用	(192)
9.5.2	工作原理	(194)
9.6	光环形器	(196)
9.6.1	作用	(196)
9.6.2	工作原理	(196)
9.7	光耦合器	(198)
9.7.1	作用	(198)
9.7.2	工作原理	(199)
9.8	波分复用器	(202)
9.8.1	作用	(202)
9.8.2	工作原理	(203)
9.9	光分插复用器	(211)
9.9.1	作用	(211)
9.9.2	工作原理	(212)

9.10	光开关	(215)
9.10.1	作用	(215)
9.10.2	工作原理	(215)
9.11	光交叉连接器	(220)
9.11.1	作用	(220)
9.11.2	工作原理	(221)
9.12	光波长变换器	(225)
9.12.1	作用	(225)
9.12.2	工作原理	(226)
	参考文献	(229)
第 10 章	波分复用系统	(230)
10.1	波分复用技术	(230)
10.2	系统技术规范	(235)
10.2.1	光接口应用代码	(235)
10.2.2	工作波长要求	(237)
10.2.3	光通道衰减	(240)
10.2.4	光通道色散	(240)
10.2.5	光监控通路	(240)
10.3	波分复用系统	(243)
10.4	系统设备	(245)
10.5	系统光层保护技术	(248)
10.5.1	保护要求	(248)
10.5.2	保护方式	(248)
10.6	系统性能	(251)
10.6.1	传输限制	(251)
10.6.2	性能	(256)
10.7	系统测试	(262)
	参考文献	(265)
第 11 章	80X40 Gb/s 高速波分复用系统工程应用	(266)
11.1	研究重点	(266)
11.2	系统关键技术	(268)
11.2.1	总体技术方案	(268)
11.2.2	关键技术	(268)
11.3	DWDM 系统工程设计	(280)
11.3.1	设计要求	(280)
11.3.2	工程设计方案	(280)
11.3.3	工程网管系统方案	(280)
11.3.4	工程设计	(283)
11.3.5	系统光信噪比模拟	(285)
11.3.6	PMD 限制	(286)

11.4	工程测试结果	(287)
	参考文献	(289)
第 12 章	长途干线光网络	(291)
12.1	光网络演进	(291)
12.2	光传送网	(294)
12.2.1	概念	(294)
12.2.2	分层与分割	(294)
12.3	长途干线光网络	(296)
	参考文献	(298)
第 13 章	城域光网络	(299)
13.1	概述	(299)
13.2	城域网波分复用技术	(302)
13.2.1	密集波分复用技术	(302)
13.2.2	粗波分复用技术	(305)
13.3	多业务传输平台	(315)
13.3.1	概述	(315)
13.3.2	以太网业务的多业务传输平台	(318)
13.3.3	ATM 业务的多业务传输平台	(322)
13.3.4	网络应用	(323)
13.4	弹性分组环	(325)
13.4.1	提出	(325)
13.4.2	RPR 技术	(326)
13.4.3	特点	(327)
13.4.4	关键技术	(327)
13.4.5	应用方式	(330)
13.5	多业务环技术	(331)
	参考文献	(333)
第 14 章	自动交换光网络	(335)
14.1	产生背景	(335)
14.2	体系结构	(336)
14.2.1	三个功能平面	(336)
14.2.2	三种接口	(337)
14.3	控制平面	(339)
14.3.1	控制平面功能	(339)
14.3.2	信令网	(340)
14.4	实现原理	(341)
14.4.1	三种网络模型	(341)
14.4.2	节点结构	(342)
14.4.3	三种连接方式	(343)
14.4.4	实现原理	(345)

14.5	ASON 设备	(346)
14.6	ASON 功能与性能测试	(346)
14.7	应用示例	(348)
14.7.1	特点	(348)
14.7.2	定位	(348)
14.7.3	应用实例	(349)
	参考文献	(350)
第 15 章	光纤接入光网络	(351)
15.1	网络分工	(351)
15.2	接入网定义	(351)
15.3	技术分类	(352)
15.3.1	带宽需求	(352)
15.3.2	宽带接入技术	(354)
15.3.3	光接入网	(359)
15.4	功能模型	(360)
15.5	支持业务种类	(362)
15.6	有源光网络	(362)
15.7	无源光网络	(363)
15.7.1	技术优势	(363)
15.7.2	关键技术	(365)
15.7.3	APON	(366)
15.7.4	EPON	(368)
15.7.5	GPON	(372)
15.7.6	EPON 与 GPON 的比较	(375)
15.7.7	波分复用无源光网络	(375)
	参考文献	(376)

第1章 概 论

1.1 光纤通信技术发展简史

1.1.1 光纤通信概念

光纤通信是以激光作为载体,以光纤作为传输媒介的通信方式。与电缆或微波等电通信相比,光纤通信具有传输频带宽、传输衰减小、信号串扰弱、抗电磁干扰等能力强的优点。因此,当今全世界通信方式中已形成了一个以光纤通信为主,微波、卫星通信为辅的格局。

现在,以大有效面积非零色散位移光纤、光纤放大器和波分复用技术共同组成的密集波分复用光纤传输系统已经普及全世界的长途干线光网络,以及城域光网络的骨干层。今天,由光纤构筑的光网络拓扑已延伸到全球的各个城乡角落,光缆正向到家庭和桌面敷设,以实现光纤通信的最终目的。为了使读者能够全面地了解光纤通信技术的整个发展历程,作者对近 30 年国内外光纤通信研究中所取得的一些重大技术成果按照诞生的时间先后顺序做了如下大致归纳,供广大读者参考。

1.1.2 技术发展简史

原始的光通信可以追溯到古代的烽火台狼烟报警和光电报。狼烟报警和光电报的不足之处是传递的信息内容少、速度慢且无法保密。早期的光纤通信是 1920 年美国的 Clarence W. Hansell 等以透明棒或空心管阵列传输传真或电视。这些透明棒和空心管阵列光纤没有包覆玻璃或者塑料包层,它们的导光性能很差,只能用于传输距离为 1 m 的人体内窥镜。1930 年,德国的 Heinrich Lamm 发明了第一根利用光纤束进行图像传输的光缆。

20 世纪 50 年代,美国光学公司的 Brian O'Brien 等研制出了第一台实用的全玻璃光纤组成的图像传输设备。由于光信号在光纤的传输损耗很大,所以该设备传输距离十分有限。

1958 年,Arthur L. Schawlow 等发明了激光器并在美国的《物理综述》上发表了题目为“红外与光激励器”的论文,该论文阐述了激光器的受激辐射光放大的基本原理,从而开创了一个崭新的科学领域。

1960 年,人们研制出了红宝石激光器和氦-氖激光器。同年,英籍华人高锟(现为美籍)预言,光纤通信可以进入实用的可能性。他预测了光纤能够获得的性能水平,并提出了通信光纤的基本结构和实际使用方法。

1965 年,美国贝尔实验室的 Stewart Miller 领导了一个研究小组进行气体透镜的研究。他们把 1960 年贝尔实验室发明的激光器发出的激光聚焦耦合至空心波导中。由于空心波导光纤存在的高衰减问题,使研究无法将激光耦合进入空心波导光纤。随后,人们又进行了大气(自由空间)激光通信的研究。在大气激光通信中,信源端的激光器发出的激光信号通过大气介质传输到信宿端。由于大气环境的风、雨、雪、雾的变化无常,所以通信质量无法得

到长期稳定的保证。

1966 年 7 月,在英国标准电信实验室工作的高锟和 George A. Hockham 根据激光携带的信息容量是最高的无线电携带的信息容量 10 000 倍的事实和介质波导理论提出光纤通信的概念。高锟预言,只要在光纤制造中消除原料中的各种杂质,制造出 20 dB/km 衰减(即 99% 的光功率都被损耗在所传输的 1 km 距离上)的光纤就可以实现商用光纤的目的。

1970 年,美国康宁公司的 Robert D. Maurer 等人按照高锟减小光纤衰减的办法是降低原料中所含杂质的思想,利用提纯和气相沉积工艺方法制造出了衰减系数为 20 dB/km 的光纤。随后的研究工作重点转入光源和光检测器。最早的光源、光检测器和光纤的工作波长都是 850 nm。850 nm 波长范围是石英玻璃的第一个工作窗口,其位置恰好是光损耗最小波长范围。石英玻璃在 850 nm 波长范围的衰减系数为 3 dB/km。

美国康宁公司的研究人员始终在进行降低光纤衰减的研究工作。1975 年,石英玻璃光纤在 1310 nm 第二个工作窗口的衰减系数已经降低到了 0.5 dB/km。1977 年,日本电报电话公司(Nippon Telegraph and Telephone, NTT)的研究人员提出,石英玻璃光纤在 1550 nm 第三个工作窗口的衰减系数大约为 0.2 dB/km。

1976 年,世界上的第一个以 44.736 Mb/s 传输 110 km 的光纤通信系统在美国的亚特兰大成功地投入现场实用化试验。1977 年,美国 AT&T 贝尔实验室的科学家在电话公司开通了世界上的第一个光纤通信系统,这个系统通过公共交换网可以向用户提供语音、数据和图像全业务通信。

在 20 世纪 70 年代中期,美国、日本等发达国家研制出了第一个实用的光复用器件。1976 年,武汉邮电科学研究院研制出中国的第一根多模光纤。1977 年,Tomlinson 和 Aumiller 首先成功地开发出了第一个光栅波分复用无源器件。

1980 年,在美国举行的冬季奥运会上,人们利用光纤通信系统进行了图像传输,这是世界上的第一个光纤图像传输系统,该系统达到了图像清晰和可靠性好的双重效果。

1981 年,武汉邮电科学研究院研制出中国的第一个光纤通信用的长波长光器件。1982 年,开通了我国第一个光纤通信系统,这标志着我国开始进入光纤通信时代。在 20 世纪的 80 年代中期,人们又发现通信用的 G.652 单模光纤在两个低衰减工作窗口,即 1310 nm 和 1550 nm 之间具有一个很宽的可用来传输大量信息的光谱范围(除了在 1385 nm 附近有一个由残留的 OH⁻引起的一个很大的衰减之外)。同时,G.652 单模光纤在 1550 nm 的最小衰减系数水平已经达到了 0.16 dB/km,工作波长范围一般为 1520~1620 nm。

1986 年,日本住友公司利用轴向气相沉积法制造出的纯硅芯石英玻璃光纤(Pure Silica Core Fiber, PSCF)的衰减系数为 0.154 dB/km,创造了 PSCF 的衰减系数世界记录。2002 年,日本住友公司刷新了 PSCF 的最低衰减系数的记录,所研制的 PSCF 在 1310 nm 和 1550 nm 的衰减系数进一步分别降低到 0.265 dB/km 和 0.1495 dB/km,该光纤在 1570 nm 的最小衰减系数为 0.1484 dB/km。

在 1987 年发明了掺铒光纤放大器(Erbium Doped Optical Fiber Amplifier, EDFA)。由于激光器泵浦光源激励 EDFA 可以放大 1530~1565 nm 窗口的信号光波长,而传输用的单模光纤和色散补偿单模光纤的工作波长范围都在 1520~1620 nm,从而为中—长距离的密集波分复用(Dense Wave Division Multiplexing, DWDM)传输的商用奠定了坚实的基础。

1988 年,完成了第一条连接北美和欧洲的跨洋海底光缆铺设任务。这条长度为 3148 英里(1 英里≈1609.344 m)的海底光缆可以同时接通 120 000 路电话业务。

1990 年,美国 AT&T 贝尔实验室开展了传输速率为 2.5 Gb/s,无中继传输距离为 7500 km 的传输试验。为了保持传输光信号的形状和强度,这个系统使用了孤子激光器和掺铒光纤放大器。

自 20 世纪 90 年代以来,光纤通信在我国得到了迅速发展,中国电信长途干线由链状结构逐步发展为环状网和网格网,市内中继通信线路已全部采用光纤。20 世纪 90 年代初期,我国干线通信建设全部以 G.652 单模光纤为主。

1993 年,武汉邮电科学研究院研制出中国第一套 565 Mb/s 的 PDH 设备。

20 世纪 90 年代中期,非零色散位移单模光纤得到了充分的应用。我国已建成了横穿东西、纵贯南北的“八纵八横”的光纤干线骨干通信网,同时一些业务发达地区进行了网络扩容,采用了高速同步数字体系(Synchronous Digital Hierarchy, SDH)技术和 DWDM 技术。省内的光缆干线也已初步建成。

1995 年,美国启动了世界上的第一个 8×2.5 Gb/s 的 DWDM 试验系统,该系统具有多个光分/插复用接点和光交叉连接接点,传输业务包括数据、数字视频和分布有线电视等,传输距离全长为 2000 km 以上。

1996 年,武汉邮电科学研究院研制出中国第一套 2.5 Gb/s 的 SDH 设备。

1997 年,武汉邮电科学研究院研制出中国第一套 DWDM 系统并开发出了适用于大容量、长距离全光传输的核心器件掺铒光纤放大器。

1998 年,美国 AT&T 贝尔实验室开展了同时传输 100 个光信号,每个光信号的传输速率为 10 Gb/s,传输距离为 400 km 的 DWDM 传输试验。这个试验验证了,利用 DWDM 技术通过将多个波长组合成一个光信号在一根光纤中传输的方式,可使一根光纤中的总传输率提高到 1 Tb/s (10^{12} b/s)。

1998 年,武汉邮电科学研究院开通了中国的第一个 DWDM 工程(中国电信国家一级干线,济南—青岛,8×2.5 Gb/s)。光网络以其先进性、开放性及经济性,吸引了国内各大高校、科研院所及著名通信公司的广泛关注。为跟踪和赶超国外在光网络方面的先进水平,加快我国信息基础结构研究的应用工作,形成了具有自主知识产权的产品并为我国光纤通信及相关领域的研究奠定了人才基础。

1998 年,日本、韩国和瑞典等国家开展建设无源光网络的试验工程。

1999 年 9 月,国家 863 项目组下发了跨世纪、跨课题的一个重大项目——中国高速信息示范网(China Information Network, CAINONET)。该项目的目标就是要在我国建立一个 DWDM 全光互联网,为所有接入业务 IP、ATM、PSTN 和 SDH 等建立一个统一的操作平台,使子网之间可以很方便地实现互连互通,即实现全光域上的互联网。1999 年,武汉邮电科学研究院研制出中国第一套 32×2.5 Gb/s 的 DWDM 系统。

20 世纪 90 年代末,各地的接入光网络也得到了迅速的发展,现在我国光缆的总长度已超过 100 万皮长千米。我国参与投资建设的亚欧陆地光缆系统、国际海底光缆系统已相继开通,中美海底光缆也即将建成,一个通达全国各地,连通世界的先进的光网络架构已经形成。

2000 年,武汉邮电科学研究院又开通了我国第一个 32 波 DWDM 工程(中国电信国家一级干线,贵阳—兴义,32×2.5 Gb/s)。同年,在国内首次开发出光交叉连接和光分复用设备。同年,武汉邮电科学研究院的余少华博士向国际电信联盟提交中国第一个 IP 通信技术建议(ITY-T X.85)。

2001 年,武汉邮电科学研究院研制的全球第一套互连互通的全光网设备进入实际工程应

用。2001 年,日本 NEC 公司在实验室创造的 DWDM 最高传输容量已达 10.9 Tb/s(273×40 Gb/s,其传输的距离是 100 km)。

2001 年,北京邮电大学在国家“863”计划重大课题资助下开始从事以太网无源光网络的研究工作。他们的研究成果推动了我国的光纤到户的技术进步和工程应用的步伐。

2002 年,美国朗讯科技公司实现了 60×40 Gb/s 的 4000 km 的超长距离波分复用传输试验。2002 年,国内各大设备制造商已经成功研制出了超大容量的 160×10 Gb/s DWDM 系统,标志着我国在 DWDM 光网络方面的发展与国际水平十分接近。非零色散位移光纤的使用,使得 SDH 系统向 WDM 过渡时可有效地抑制四波混频等非线性效应,为我国光纤通信系统向 WDM 全光网的发展铺平了道路,为我国大规模 SDH 系统的改造奠定了坚实的基础。不论是 IP over ATM、IP over SDH、IP over DWDM,还是 WDM 在城域网和接入网方面的发展,我国已建成的光网络都有坚实的基础设施,具有重大的作用和发展前景。在 21 世纪,建设多色宽带网将是我国光网络发展建设的主要战略方向。

2003 年,法国阿尔卡特采用非归零调制方式,在 G.652 单模光纤上成功地进行了 40×40 Gb/s 的 2540 km 传输试验。

2003 年,武汉邮电科学研究院推出了城域网多业务传输平台设备,全面融入了多协议标签交换、链路容量自动调整、ATM 反向接口复用、智能控制等多种先进技术,可以充分应对传统传输网络向下一代光网络的平滑演进。2003 年 9 月,武汉邮电科学研究院、北京邮电大学和北京大学共同承担了“863 计划”80×40 Gb/s 的 DWDM 光传输系统研究课题——320 km 的无电再生的中继。

2003 年 3 月,国际电信联盟发布了第一个吉比特无源光网络标准,即 ITU-T G.984.1《吉比特无源光网络(GPON)》。

2004 年 1 月,80×40 Gb/s 的 DWDM 光传输系统实现了 320 km 的无电再生传输试验,取得了大量试验数据,为该系统日后的商用奠定了一定的基础。

2004 年 2 月,由武汉邮电科学研究院独立研制出了“160×10 Gb/s 的 3040 km 超长距离 DWDM 光传输系统”通过了国家 863 项目专家组的验收。这个系统的传输线路是由 3040 km 的 G.652 光纤组成的(38×80 km),同时使用 C+L 波段;采用 50 GHz 的信道间隔,通过拉曼放大技术对 C+L 波段进行同时放大;利用 160×10 Gb/s DWDM 光传输设备作为基础应用平台,配合超长传输系统的关键技术,如分布式拉曼放大技术、非线性效应抑制管理技术、超强的前向纠错技术、动态增益均衡技术和多种编码(如非归零码、归零码、载波抑制-归零码)技术等实现超长距离传输。这个超长距离 DWDM 光传输系统是国内第一个商用超长距离 DWDM 光传输系统。它的成功研制标志着我国的光纤技术达到了国际业界同等水平。

2004 年 7 月,中国移动在国内首次委托信息产业部传输所对国内各大光传输设备厂商的自动光交换的设备进行了大规模的专业测量,以烽火公司为代表的国内厂商参与并通过了自动光交换设备的测量,从而标志着我国的传统光网络如何向着智能光网络的方向发展。自动光交换设备具备超大容量、高密度、高可靠性等特点,为智能光网络的建设注入引擎,引入全新业务。武汉邮电科学研究院承担的“863 项目”以太网无源光网络通过了“863”专家组的验收。光纤到家庭进入商业试验阶段,系统技术的进一步发展是实现在光传输网的自动光交换,实现真正意义上的全光网。

2004 年,欧洲光通信会议有关论文介绍了:(1)已经完成了 64×40 Gb/s 的 1000 km 超长距离 DWDM 光传输系统试验;(2)预计 2006 年后可研制出 10 Tb/s DWDM 光传输设备。