

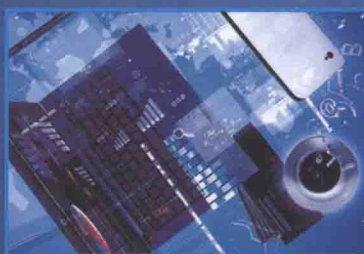


普通高等教育“十一五”国家级规划教材
高等院校通信与信息专业规划教材

光纤通信系统

第3版

FIBER OPTIC COMMUNICATION SYSTEMS



沈建华 陈健 李履信 编著

 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



本书赠送电子教案

普通高等教育“十一五”国家级规划教材
高等院校通信与信息专业规划教材

光纤通信系统

第3版

沈建华 陈 健 李履信 编著



机械工业出版社

本书紧密结合光通信的发展,全面系统地介绍了光纤通信系统的构成及关键技术。具体内容包括光纤光缆的结构和类型,光纤的传输理论和传输特性,光源和光发送机、光检测和光接收机的原理,无源器件及光放大器原理,光纤数字通信系统及性能指标,波分复用及光传送网、光接入网等光网络技术,以及无线光通信和量子光通信等新技术。

本书以光纤通信系统的组成为主线,从单个器件介绍再到完整系统架构及性能,内容深入浅出、概念清楚,覆盖面广且重点突出,可作为高校电子、通信和信息类专业本科的教学用书,也可作为从事光纤通信工作的相关科技人员和管理人员的参考用书。

本书配有电子教案,需要的教师可登录 www.cmpedu.com 免费注册后下载,或联系编辑索取(QQ: 241151483, 电话 010-88379753)。

图书在版编目(CIP)数据

光纤通信系统 / 沈建华, 陈健, 李履信编著. —3 版. —北京: 机械工业出版社, 2014. 1

高等院校通信与信息专业规划教材

ISBN 978-7-111-45474-8

I. ①光… II. ①沈… ②陈… ③李… III. ①光导纤维通信系统—高等学校—教材 IV. ①TN929.11

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 010890 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑: 李馨馨

责任编辑: 李馨馨

责任印制: 乔 宇

保定市中国画美凯印刷有限公司印刷

2014 年 2 月第 3 版·第 1 次印刷

184mm×260mm·18.25 印张·451 千字

0001—3000 册

标准书号: ISBN 978-7-111-45474-8

定价: 39.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心: (010) 88361066

教材网: <http://www.cmpedu.com>

销售一部: (010) 68326294

机工官网: <http://www.cmpbook.com>

销售二部: (010) 88379649

机工官博: <http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线: (010) 88379203

封面无防伪标均为盗版

高等院校通信与信息专业教材

编委会名单

(按姓氏笔画排序)

编委会主任	乐光新	北京邮电大学
编委会副主任	张文军	上海交通大学
	张思东	北京交通大学
	杨海平	解放军理工大学
	徐澄圻	南京邮电大学
	吴镇扬	东南大学
	王金龙	解放军理工大学
	刘 陈	南京邮电大学
编委会委员	赵尔沅	北京邮电大学
	邹家禄	东南大学
	张邦宁	解放军理工大学
	张玲华	南京邮电大学
	徐惠民	北京邮电大学
	王成华	南京航空航天大学
	王建新	南京理工大学
	彭启琮	电子科技大学
	南利平	北京信息科技大学
	刘增基	西安电子科技大学
	刘富强	同济大学
	李少洪	北京航空航天大学
	冯正和	清华大学
秘 书 长	胡毓坚	机械工业出版社
副 秘 书 长	许晔峰	解放军理工大学

出版说明

为了培养 21 世纪国家和社会急需的通信与信息领域的高级科技人才，为了配合高等院校通信与信息专业的教学改革和教材建设，机械工业出版社会同全国在通信与信息领域具有雄厚师资和技术力量的高等院校，组成阵容强大的编委会，组织长期从事教学的骨干教师编写了这套面向普通高等院校的通信与信息专业系列教材，并且将陆续出版。

这套教材将力求做到：专业基础课教材概念清晰、理论准确、深度合理，并注意与专业课教学的衔接；专业课教材覆盖面广、深度适中，不仅体现相关领域的最新进展，而且注重理论联系实际。

这套教材的选题是开放式的。随着现代通信与信息技术日新月异地发展，我们将不断更新和补充选题，使这套教材及时反映通信与信息领域的新发展和新技术。我们也欢迎在教学第一线有丰富教学经验的教师及通信与信息领域的科技人员积极参与这项工作。

由于通信与信息技术发展迅速，而且涉及领域非常宽，这套教材的选题和编审中难免有缺点和不足之处，诚恳希望各位老师和同学提出宝贵意见，以利于今后不断改进。

机械工业出版社
高等院校通信与信息专业规划教材编委会

前 言

本教材第 1 版于 2003 年出版，第 2 版于 2007 年出版，在国内多所高校的信息通信相关专业的教学中使用，得到了较好的评价。光纤通信是信息通信技术中发展最为快速的领域之一，随着包括移动互联网、大数据、云计算和物联网等新一代业务和应用的快速推进，对光纤通信技术的要求也不断提高。近年来，超高速率的相干光通信系统已经初步商用化，光纤到户也已成为宽带接入领域内最主要的实施方案，全光交换和组网技术也已得到了初步的应用，光纤通信的发展势必会迎来又一个高峰。为适应光纤通信的新发展，对本教材进行修订显得尤为迫切。

本次修订时，在保留了上一版教材概念清楚、重点突出优点的同时，以光纤通信系统的内在组成为主线，对全书的架构进行了重新梳理；同时也根据技术的发展和进步，增加了一些实用性强的新技术内容，使得本教材更加适应光纤通信的网络化、智能化和全光化等发展趋势。第 1 章导论部分对光纤通信系统的产生、发展、组成和发展趋势给出了概括性的介绍；第 2~7 章从系统组成各部分入手，介绍了一个完整的光纤通信系统的组成；第 8 章重点介绍了多信道光纤通信系统；第 9 章则是对光纤通信系统性能的分析 and 工程设计相关知识的介绍；第 10 章分别讨论了光接入网、计算机高速互联光网络、智能光网络 and 全光网等光网络技术；第 11 章介绍了相干光通信、无线光通信 and 量子光通信等新技术。

全书主要由沈建华编写并统稿，陈健和李履信老师参加了部分章节的编写，陈健老师对书稿提出了许多有益的意见和建议，李履信老师对本书第 1 版的编写做出了很大的贡献，在此一并表示感谢。

由于作者水平有限，书中难免存在缺点和错误，恳请广大读者批评指正。

编 者

目 录

出版说明

前言

第 1 章 导论	1
1.1 光纤通信的产生和发展	1
1.1.1 光通信的产生	1
1.1.2 光纤通信的发展历程	2
1.2 光纤通信系统	4
1.2.1 光纤通信系统的基本结构	4
1.2.2 光纤通信系统的组成及作用	5
1.3 光纤通信的应用和发展	6
1.3.1 光纤通信系统的特点	6
1.3.2 光纤通信系统的应用	7
1.3.3 光纤通信的发展趋势	8
1.4 习题	9
第 2 章 光纤与光缆	10
2.1 光纤光缆的结构和类型	10
2.1.1 光纤结构	10
2.1.2 光纤类型	12
2.1.3 光纤制造工艺	13
2.1.4 光缆及其结构	14
2.2 光纤传输原理	17
2.2.1 射线光学理论分析法	17
2.2.2 波动光学理论分析法	19
2.2.3 单模传输条件	22
2.3 光纤传输特性	23
2.3.1 损耗特性	24
2.3.2 色散特性	26
2.3.3 非线性效应	28
2.3.4 随机双折射与偏振模色散	29
2.4 常用光纤类型	30
2.5 习题	33
第 3 章 光源和光发送机	35
3.1 光源	35

3.1.1	激光产生原理	35
3.1.2	半导体激光器	39
3.1.3	发光二极管	48
3.2	光源调制	50
3.3	光发送机	50
3.3.1	光发送机的结构	51
3.3.2	光发送机的性能参数	58
3.4	习题	59
第4章	光检测器和光接收机	60
4.1	光检测器	60
4.1.1	光检测原理	60
4.1.2	PIN 光敏二极管	62
4.1.3	雪崩光敏二极管	65
4.1.4	PIN 与 APD 对比	68
4.2	光接收机	68
4.2.1	光接收机的结构	68
4.2.2	光接收机的性能指标	72
4.3	灵敏度及噪声分析	73
4.3.1	理想接收机灵敏度	73
4.3.2	光接收机噪声分析	76
4.3.3	光接收机误码率	78
4.4	光中继机	80
4.5	习题	81
第5章	无源光器件	82
5.1	光纤连接器	82
5.1.1	光纤连接器原理	82
5.1.2	光纤连接器类型	83
5.1.3	光纤连接器性能参数	85
5.2	光纤耦合器	85
5.2.1	光纤耦合器原理	85
5.2.2	光纤耦合器结构	86
5.2.3	光纤耦合器性能参数	88
5.3	光衰减器	88
5.4	光隔离器与光环行器	89
5.4.1	光隔离器	89
5.4.2	光环行器	91
5.5	光调制器	91

5.6	光开关	93
5.6.1	机械光开关	93
5.6.2	固体波导光开关	94
5.7	习题	95
第6章	光放大器	96
6.1	光放大器基础	96
6.1.1	光放大器的基本原理	96
6.1.2	光放大器的主要参数	97
6.1.3	光放大器的分类	100
6.2	掺铒光纤放大器	101
6.2.1	EDFA 的特点	101
6.2.2	EDFA 的结构及工作原理	101
6.2.3	EDFA 的性能参数	103
6.2.4	EDFA 的应用	105
6.3	光纤拉曼放大器	106
6.3.1	FRA 的工作原理	106
6.3.2	FRA 的结构	107
6.3.3	FRA 的特点及应用	108
6.3.4	FRA 的噪声特性	109
6.3.5	混合拉曼/掺铒光纤放大器	110
6.4	新型光纤放大器	110
6.4.1	光纤放大器的需求	110
6.4.2	掺镨氟基光纤放大器	111
6.4.3	掺铒波导放大器	111
6.4.4	遥泵放大技术	111
6.5	习题	112
第7章	数字传输体制	113
7.1	概述	113
7.2	准同步数字体系	114
7.2.1	PDH 的复用原理	114
7.2.2	PDH 复用主要技术	115
7.2.3	PDH 技术特点	116
7.3	同步数字体系	116
7.3.1	SDH 帧结构	116
7.3.2	SDH 复用和映射过程	119
7.3.3	SDH 网元设备	126
7.3.4	SDH 网同步	127

7.3.5	SDH 传送网	131
7.3.6	SDH 网络管理	138
7.3.7	城域光纤通信网络	138
7.3.8	基于 SDH 的多业务传送平台	142
7.4	光传送网	146
7.4.1	OTN 的基本原理	146
7.4.2	OTN 的复用映射结构	147
7.4.3	OTN 的关键技术	148
7.5	习题	149
第 8 章	光波分复用系统	151
8.1	波分复用原理	151
8.1.1	WDM 系统的基本概念	151
8.1.2	WDM 系统的应用形式	152
8.2	WDM 系统结构及分类	154
8.2.1	WDM 系统结构	154
8.2.2	WDM 系统分类方法	155
8.2.3	WDM 系统波长规划	157
8.3	WDM 系统关键技术	158
8.3.1	光源技术	159
8.3.2	波分复用器/解复用器	160
8.3.3	光波长转换器	164
8.3.4	光纤传输技术	166
8.3.5	光放大器增益钳制技术	173
8.3.6	光监控信道技术	174
8.4	WDM 设备与组网	175
8.4.1	WDM 设备类型及应用场合	175
8.4.2	WDM 网络结构	176
8.4.3	WDM 网络保护	179
8.5	光时分复用	183
8.6	习题	184
第 9 章	光纤通信系统性能	185
9.1	数字传输模型	185
9.1.1	数字传输模型的原理及意义	185
9.1.2	数字传输模型的分类	185
9.1.3	光传送网传输模型	187
9.2	光接口性能	187
9.2.1	SDH 光接口性能	187

9.2.2	WDM 光接口性能	189
9.3	光纤数字通信系统性能	190
9.3.1	误码	190
9.3.2	抖动	195
9.3.3	漂移	199
9.3.4	延时	199
9.4	光纤通信系统可用性	200
9.4.1	基本概念	200
9.4.2	光纤通信系统可用性计算	201
9.4.3	光纤通信系统可用性指标要求	202
9.5	光纤通信系统设计	202
9.5.1	光纤通信系统设计的主要方法	202
9.5.2	影响系统设计的主要参数	203
9.5.3	最坏值法设计过程	204
9.6	习题	205
第 10 章	光纤通信网	206
10.1	光接入网	206
10.1.1	接入网概述	206
10.1.2	光纤接入网	208
10.1.3	光接入网关键技术	215
10.1.4	无源光网络	220
10.2	计算机高速互联光网络技术	236
10.2.1	光纤分布式数据接口	236
10.2.2	光纤通道	237
10.2.3	高速计算机光互联技术	239
10.3	智能光网络	240
10.3.1	智能光网络概述	240
10.3.2	自动交换光网络	241
10.3.3	通用多协议标签交换	249
10.4	全光网	252
10.4.1	全光网原理	252
10.4.2	全光交换技术	253
10.4.3	全光网节点技术	256
10.5	习题	259
第 11 章	光纤通信新技术	261
11.1	相干光通信	261
11.1.1	相干光通信系统原理	261

11.1.2 相干光通信关键技术	262
11.2 光孤子通信技术	264
11.2.1 光孤子通信系统的基本组成	264
11.2.2 影响光纤孤子通信系统容量的因素	265
11.3 空间光通信	266
11.3.1 空间光通信的原理和特点	266
11.3.2 大气激光通信系统	267
11.3.3 FSO 关键技术	268
11.3.4 短距可见光通信	270
11.4 量子光通信	271
11.4.1 量子光通信原理	271
11.4.2 量子纠缠和量子隐形传态	272
11.4.3 量子密钥分配协议	273
11.5 习题	273
附录	274
术语表	274
参考文献	279

第1章 导 论

1.1 光纤通信的产生和发展

1.1.1 光通信的产生

通信是指人与人、人与自然之间通过某种行为或媒介进行的信息交流与传递，从广义上是指需要信息交互的双方或多方在不违背各自意愿的情况下，采用某种方法和使用适宜的媒质，将信息从某一方准确、安全地传送到另一方并真实准确再现的完整过程。狭义上而言，通信就是借助于某种手段实现两个或多个实体之间信息交换的过程，通信系统则是该过程的具体实现。一个完整的通信系统包括了信息的采集、格式变换、传输和交换等过程所涉及的所有实体，而光通信是指利用某种特定波长（频率）的光波信号承载信息，并将此光信号通过光波导或者大气信道传送到对方，然后再还原出原始信息的过程。广义上的光通信或光波通信（Lightwave Communication）包括光纤通信（Optical Fiber Communication）和大气光通信/空间光通信（Free Space Optics）两大类，目前在通信领域内主要采用的是光纤通信方式。

古代的中国已经利用光信号来传递信息，例如建造烽火台，用烟和火来报警。此外，从古代沿用至今的旗语、灯光和手势等，都可以看作是某种形式的光通信。当然，这些依赖可见光信号传递信息的方法不仅较为简单，易受外界因素（如阳光、大雾和雨雪天气等）的影响，同时信息的内容也极为有限且不可靠，信息传输的有效距离非常短。严格来说，上述这些都不能称之为真正意义的光通信。1880年，贝尔（A. G. Bell）发明了光电话，这被认为是现代意义光通信的起源。贝尔利用弧光灯作光源，弧光灯发出恒定亮度的光束并投射在送话器的薄膜上；薄膜随发送端的人声而振动，使得接收端接收到的光束强弱变化就可以反映出声音的振动规律。在接收端利用一个大型的抛物面反射镜，把发送端送来的随着声音变化的光反射到硅光电池上，硅光电池转变的光电流再送给受话器还原出原始语音，就完成了发送和接收的过程。

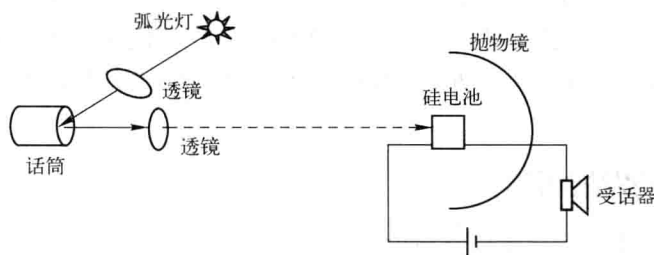


图 1-1 贝尔发明的光电话

贝尔发明的光电话提供了最基本的光通信的雏形，但自此之后的相当长一段时间内，光

通信技术的进展非常缓慢，始终未能成为通信系统中的主流技术。究其原因，首先是贝尔所用的光源是热辐射源，其发出的光是非相干光，单色性和方向性差且调制困难。其次，作为接收机的硅光电池内部噪声很大，导致接收机的灵敏度很低。更为重要的是，由于没有一个适宜的光信号传输媒质，可见光在大气中传输的损耗很大，无法实现长距离的光通信。

随着研究的不断深入，人们注意到实用化的光通信主要面临两个问题：一是寻找适宜的光源，另一个是探寻对光信号具有良好传输性能的媒质。20世纪60年代，美国科学家梅曼率先研制成功了红宝石激光器，人们迅速注意到这种谱线很窄、方向性极好、频率和相位都高度一致的相干光——激光可以作为光通信理想的光源。后来，人们相继发明了氦氖激光器、二氧化碳激光器和染料激光器等，并利用这些激光器作为光源进行了激光大气传输的试验。但是由于这些激光器存在体积大和功耗大等缺点，同时以大气作为传输媒质受气候影响极大。因此，需要寻找更为合适的光源及理想的传光媒质。

1966年，在英国标准电信实验室工作的华裔科学家高锟（C. K. Kao）和 G. A. Hockham 首先提出可以用提纯的石英玻璃纤维（即光导纤维，简称光纤）作为光通信的媒质，这为光通信迈向实用化奠定了重要的理论基础，高锟也因此获得了2009年的诺贝尔物理学奖。1970年，美国康宁公司采用超纯石英为基本材料，首先拉制出了损耗系数低于20dB/km的光纤，这是光纤迈向实用化传输媒质的最重要的一步。在光纤制造工艺有了重大突破的同一年，美国贝尔实验室研制成功了可以在室温下连续振荡的半导体材料镓铝砷（GaAlAs）为核心的半导体激光器，为光纤通信找到了合适的光源，1970年也被认为是光纤通信实用化的开始。

光源和传输媒质问题的解决，极大地推动了光纤通信的发展。1973年，贝尔实验室发明了用改进的化学气相沉积（MCVD）方法制造光纤，可以使光纤的损耗系数下降到1dB/km。1974年，日本解决了光缆的现场敷设及接续问题。1975年出现了光纤活动连接器，解决了光纤线路和传输系统间的连接问题。1976年，日本把光纤的损耗降低到0.5dB/km，同年，美国首先成功地进行了系统容量为44.736Mbit/s，传输距离为10km的光纤通信系统现场试验。1979年，美国和日本先后研制出工作波长为1550nm的半导体激光器，日本制造出了超低损耗光纤（0.2dB/km，工作波长1550nm），同时进行了多模光纤1310nm波长系统的现场试验。到了1980年，采用多模光纤的通信系统已投入商用，单模光纤通信系统也进行了现场试验。在随后的数年中，日本、英国、美国等发达国家都开始着手兴建光纤干线通信系统，光纤通信逐渐取代了传统的微波和同轴电缆，成为通信网络最主要的传输手段。随着光纤通信技术的日益成熟，光缆线路覆盖的地域已经从陆地向海洋延伸，美、日、英等国联合建立的横跨太平洋和大西洋的海底光缆都相继开通，依托光纤通信系统实现的全球范围内的通信为人类社会和经济的发展提供了极大的便利。我国也于20世纪70年代开始对光纤有关的技术进行研究，取得了较大的进展，目前已经成为全球光纤通信领域综合实力最强、技术最先进的国家之一。

1.1.2 光纤通信的发展历程

光纤通信的发展大致经过了以下几个阶段。

第一代光纤通信系统在20世纪70年代末期投入使用，多为工作波长为850nm的多模光纤通信系统。光纤的损耗系数典型值为2.5~4.0dB/km，系统容量（比特率）最高为34~45Mbit/s，中继距离为8~10km。随后，工作波长为1310nm的多模通信光纤系统开始投入使用，光纤损

耗系数下降为 0.55~1.0dB/km，系统传输容量达到 140Mbit/s，中继距离为 20~30km。

第二代光纤通信系统在 20 世纪 80 年代中期投入使用，多为工作波长为 1310nm 的单模光纤通信系统。光纤损耗系数典型值为 0.3~0.5dB/km，商用系统的最高传输容量可达 140~565Mbit/s，中继距离约为 50km。

第三代光纤通信系统在 20 世纪 80 年代后期投入使用，是工作波长为 1550nm 的单模光纤通信系统。光纤损耗系数进一步下降到接近 0.25dB/km，传输速率达 2.5~10Gbit/s，中继距离可超过 100km。

第四代光纤通信系统在 20 世纪 90 年代至今应用，一方面普遍采用了光放大器来增加中继距离，同时采用波分复用/频分复用（WDM/FDM）技术来提高传输速率。目前商用系统中单信道最高传输容量可达 40Gbit/s，系统总传输容量可达 1.6Tbit/s，而在实验室中最高的系统容量已经达到 100Tbit/s 级。

从光纤通信技术发展的趋势和特点来看，光纤通信将会在超大容量超长距离传输、灵活组网、宽带接入和全光通信等方面获得进一步发展。

提高光纤通信系统的容量（传输速率）始终是光纤通信技术发展中最重要的主题之一，目前光纤通信系统的单信道传输速率已经迈入 100Gbit/s 时代，并正在向 400Gbit/s~1Tbit/s 发展。100Gbit/s 光纤通信系统中普遍采用了包括先进的码型和调制（如 QAM 和 PM-QPSK），并结合相干检测和数字信号处理技术来提高系统的灵敏度、均衡群速度色散（GVD）和偏振模色散（PMD）等引起的线性畸变，并引入高编码增益的软判决前向纠错（SD-FEC）技术来提高系统的光信噪比（OSNR）容限。未来为了实现更高等级的 400Gbit/s~1Tbit/s 长距离传输，还可能引入包括多水平调制技术（mQAM）、多载波技术如光正交频分复用（OFDM）、分布式拉曼放大（FRA）或相位敏感放大器（PSA）等低噪声放大技术、先进的软判决 FEC（SD-FEC）技术和新型超低损耗及大有效面积光纤等。

OFC/NFOEC2012 会议上，日本 NTT 公司报道了 102.3Tbit/s（ $224\lambda \times 584\text{Gbit/s}$ ，PM-64QAM）传输实验，这是迄今为止报道的单根光纤中实现的最大传输容量。实验中 224 个波长覆盖了整个 C 波段和扩展 L 波段频率范围，每个波长信号速率为 584Gbit/s，采用多载波复用，结合 64QAM 多水平调制以及偏振复用实现，传输距离达到 240km。虽然 WDM 和多水平调制技术可以有效地提高传输链路的容量，但是由于从放大、调制、纠错和更密集的载波间隔来进一步提高传输容量的空间非常有限，需要探索包括多芯和多模光纤等可能在未来对超大容量及超长距离传输提供支撑的新技术。

20 世纪 90 年代引入的光同步数字传送网（SDH）是一个将复接、线路传输及交换功能融为一体并由网管系统进行自动化管理的综合信息网，它使光纤通信从点到点传输的概念进入到网络化应用的阶段。在此基础上，为了减少传统的光纤通信系统配置复杂的缺点，光纤通信系统中开始引入智能化的控制平面技术，使得光纤通信系统也可以自动地根据用户的需求，动态和灵活地建立和拆除链接，即自动交换光网络（ASON）或智能光网络（ION），这也成为现阶段光纤通信的研究和应用热点。目前，光网络正在向动态的光网络发展，随着光网络结构和层次的日益扁平化，未来的光网络平台上将需要支持具有各种不同速率和类型的客户数据业务，光网络正在由静态的光网络向动态的、智能光网络发展。支持差异化业务分级和光层业务疏导的技术将会推动完全灵活的可重配置光分插复用器和光交叉连接器（ROADM/OXC）的应用，支持无颜色（任意波长到任意端口）、无方向（任意波长到任意方

向)、无阻塞的上/下路功能,实现对光网络业务上下路的自动配置,充分体现智能光网络的灵活性。

光纤接入网作为通信网的一部分,通过先进的光纤传输,可以为用户提供各种业务。通过光纤到家、光纤到路边、光纤到大楼等手段,将光纤引入千家万户,保证用户的多媒体信息畅通地接入核心网络。光纤通信系统巨大的带宽资源和对高层协议的透明承载能力,使得它在接入环境中呈现明显的技术优点。未来随着包括物联网和传感网等应用的普及,家庭中需要联网交换信息的节点数量将会非常巨大,因此需要光接入网提供可靠和稳定的大容量接入手段。无源光网络(PON)目前是光纤接入网中最主要的发展方向,未来除了传输容量进一步提升外,还可以与无线技术进行融合,形成混合光纤无线接入网(HWO)。

先进的光器件是构成光纤通信系统的基础。目前,光纤通信中应用的器件正向高速率、高性能、多用途、组件化及单片集成化方向发展,特别是近年来硅光子学器件取得了很大的进展,硅光子器件的调制和探测带宽都已经达到了40GHz乃至更高的水平。目前在光通信系统中的器件主要是基于InP材料,随着硅光子技术的成熟,硅光子技术将会在光子集成中扮演重要角色,不仅可以有效降低生产成本,也便于实现电光集成(EPIC)。

全光交换最初在20世纪90年代提出,主要目的是为了降低O/E/O成本。在数据中心和高性能计算应用中,上千簇服务器之间有海量的数据要传送,要求交换机能够连接大量的节点,以进行高速、低时延、低功耗的工作。当前多机架交换机和路由器主要是采用电的处理和交换技术,随着交换容量的增长,交换机的处理能力将会遇到瓶颈,功耗增加非常剧烈。光交换技术的出现将实现光信号的直接交换,在降低功耗的同时实现高速稳定的传输。随着光电器件的成熟和光子集成技术的发展,光分组交换、光突发交换必将扮演更加重要的角色,未来有可能实现从信息的产生、处理到传送等的真正意义上的全光通信。

1.2 光纤通信系统

1.2.1 光纤通信系统的基本结构

图1-2给出了一个基本的光纤通信系统构成示例。

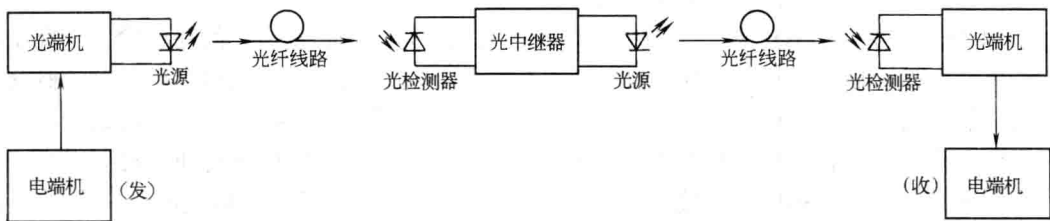


图1-2 光纤通信系统构成示例

图中所示的仅是一个方向的传输,相反方向传输的系统结构和工作原理是相同的。图中光发送部分包括了电端机和光端机两部分。其中电端机的主要作用是对不同业务信号(包括语音、文本、图像和视频等)进行处理,例如模/数转换和多路复用等。电端机输出电信号进

入光端机后，由其变换成光信号（调制）并把已调制的光波信号送入光纤传送。经光纤长距离传送后，光信号会受到光纤损耗和色散等的影响而产生畸变，为保证长距离可靠传输，系统中间可以配置光中继机，将受损的光信号转换成电信号，再进行放大、整形、再生并恢复成与光发送机输出侧相同的光信号继续传输。光接收部分中的光端机部分首先将接收到的光信号经过光检测器完成光电变换后转换成电信号，经放大、均衡、判决等过程恢复为与发送端相一致的信号，再送至接收侧的电端机还原成原始的各种业务信号。

1.2.2 光纤通信系统的组成及作用

1. 光纤

光纤是光信号的传输媒质，对光纤的基本要求是其传输参数，如损耗、色散和非线性等要尽可能小。此外，对光纤要有一定的机械特性和环境特性性能要求。工程中使用的一般是由多根光纤和包括加强元件和外部护套等绞合在一起组成的光缆，光缆线路包含了光纤、光纤固定接续和光纤活动连接器等组成部分。

目前通信网络中使用的主要是石英系单模光纤，根据其传输损耗特性，石英系光纤的工作波长主要涵盖了三个传输损耗较低的波长窗口，即 850nm、1310nm 和 1550nm。因此，光纤通信系统的工作波长应首选这三个波长窗口，包括激光器的发射波长、光检测器的响应波长、光放大器的增益波长谱和各种无源器件的工作范围都应与其一致。通信中常用的单模光纤在这三个低损耗波长窗口的损耗系数典型值分别小于 2dB/km、0.4dB/km 和 0.25dB/km。为适合不同的光纤通信系统及应用环境，研发了包括非零色散位移光纤、色散平坦光纤和弯曲损耗不敏感光纤等在内的新型光纤，关于光纤的类型和参数等将在第 2 章中详细介绍。

2. 光源

光纤通信系统中实现电-光信号变换的是光发送机，光发送机的核心器件是光源。对光源的基本要求是输出功率足够大、调制性能好、光谱线宽度窄、光束发散角小、输出光波长稳定以及器件寿命长等。目前广泛使用的光源包括半导体激光器（也称激光二极管，LD）和在低速率和小容量系统中常用的半导体发光二极管（LED）。

把电信号转换成光信号的过程是通过电信号对光源进行调制来实现的，调制分为直接调制和间接调制（也称外调制）两种。直接调制是利用电信号直接驱动半导体激光器或发光二极管，使其输出功率的大小随信号电流的大小而变，也称为强度调制（Intensity Modulation）。直接调制方式实现较为简单，但调制速率受光源调制响应等特性所限制，同时还存在频率啁啾等，不适宜在高速率光纤通信系统中使用。外调制是把激光的产生和调制分开，在激光形成稳态输出后在光路上加载调制信号，使用电致吸收器或电光调制器对激光器输出的激光进行调制，外调制方法在高速率光纤通信系统和相干光通信系统中应用较多。

光源和光发送机的相关知识将在第 3 章中介绍。

3. 光检测器

光纤通信系统中实现光-电信号变换的是光接收机，其主要功能是将经光纤线路传输后的产生畸变和衰减的微弱光信号转换为电信号，并经放大、再生恢复为原来的电信号。光接收机主要由光检测器、各级放大器和相关电路组成，对光检测器的要求是响应度高、噪声低、响应速度快等，目前广泛使用的光检测器有光敏二极管（PIN）和雪崩光敏二极管（APD）。