

GUANGXIANTONGXIN YUANLI JI YINGYONG

光纤通信原理及应用

李海 宋元胜 吴玉蓉 编著

9. 11



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

光纤通信原理及应用

李海 宋元胜 吴玉蓉 编著



中国水利水电出版社

www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书主要介绍现代光纤通信与网络的主流应用及其发展方向。全书分基础和技术应用两大部分,基础篇简要介绍现代光纤通信与网络的特点、光波在光纤中的传播、复用和放大原理以及半导体光器件的工作原理等,重点介绍了各种新型光器件和各类单模光纤;技术应用篇从总体上介绍了各类光波通信网络以及光波通信中的光波复用/解复用和交换等新技术问题,最后介绍了多业务的光纤接入网及其维护测量等技术内容。

本书立足水利、电力等行业信息化通信工程的技术工作者的学习和提高,同时兼顾广大爱好光纤通信技术的读者。该书适于作各类行业光纤通信技术培训用书,同时也适合广大科研和工程技术人员阅读和参考。

图书在版编目(CIP)数据

光纤通信原理及应用/李海,宋元胜,吴玉蓉编著.

北京:中国水利水电出版社,2005

ISBN 7-5084-2646-0

I. 光... II. ①李... ②宋... ③吴... III. 光纤通信 IV. TN929.11

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 093491 号

书 名	光纤通信原理及应用
作 者	李海 宋元胜 吴玉蓉 编著
出版 发行	中国水利水电出版社 (北京市三里河路 6 号 100044) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 63202266 (总机)、68331835 (营销中心)
经 售	全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京市兴怀印刷厂
规 格	787mm×1092mm 16 开本 16.5 印张 391 千字
版 次	2005 年 3 月第 1 版 2005 年 3 月第 1 次印刷
印 数	0001—4000 册
定 价	35.00 元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

| 前 | 言 |

光纤通信技术的诞生，引发了通信领域的一场剧烈变革。光纤通信技术问世至今短短 20 多年，光纤已取代大部分通信电缆，成为固定通信网络中最主要的传输介质，速度之快为通信史上所罕见。

在以 IP 为代表的业务迅猛增长的冲击下，现有网络的速度和带宽已不能满足迅速增长的用户需求，正当人们期盼高速宽带网诞生之时，与传统光纤传输链路截然不同的光波网络以其独有的技术优势和多波长特性，向人们展示了光纤中利用多波长组网的巨大潜力和广阔的应用前景。

随着信息化浪潮的迅猛发展，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。信息技术应用的渗透性和高附加值的特点，促使众多领域的技术工作者学习通信技术的要求变得越来越迫切。

为了让读者全面、系统、快捷地了解现代光纤通信与光网络的特点、基本原理和主流技术的应用，本书内容包括光纤通信的器件、技术，以及具有崭新技术特点的 DWDM 全光网络。因内容跨度较大，故在内容取舍上立足理论为实用服务，避免繁琐公式的推导，着重结论应用和含义的论述。

本书图文并茂，形象、直观地展示了有关知识内涵，行文通俗易懂，概念清楚，重点突出。本书适合广大爱好光通信技术的读者使用，既可以作为高等院校有关课程的教学参考书，也可以作为各类光纤通信技术的培训教材。

本书首先介绍现代光纤通信与光网络的特点，光波在光纤中的传播、复用和放大原理及半导体光器件的工作原理，重点介绍了各种新型的常用光器件和各类单模光纤，然后介绍几类重要的光波通信系统以及光波通信中的光波复用解复用和交换等新技术问题。

全书共两篇 11 章，第 1、7、8 章由武汉大学宋元胜编写，第 9、10 章由武汉科技学院吴玉蓉编写，第 2、3、4、5、6、11 章由武汉大学李海编写。在

编写的过程中得到了众多同志的关心、支持和帮助，在此表示衷心的感谢，同时还要感谢汪应春同志认真阅读校对，并提出了许多建设性的意见和建议，感谢李世萍给予文字录入和画图工作的大力支持。

由于编者水平有限，书中难免有一些缺点和错误，殷切希望广大读者批评指正。

作者

2005年2月于武汉大学

目 录

前言

第一部分 基础篇

第 1 章 绪论	3
1.1 光纤通信的发展过程	3
1.2 光纤通信系统的组成	5
1.3 光纤通信中的码型	6
1.4 全光网络的概念	8
第 2 章 光纤与光缆	11
2.1 光纤结构及类型	11
2.2 光纤传输原理	13
2.3 单模光纤	25
2.4 光纤的传输特性	28
2.5 特殊单模光纤及应用	36
2.6 光缆	40
第 3 章 有源光器件及设备	45
3.1 激光的物理基础	45
3.2 激光器	51
3.3 光电检测器	58
3.4 光源的调制	61
3.5 光端机	64
第 4 章 光无源器件	73
4.1 光纤连接器	73
4.2 光耦合器	75
4.3 波分复用器/解复用器	78
4.4 光隔离器及光环行器	81
4.5 光波导调制与光开关	83
4.6 光衰减器	84
第 5 章 光纤放大器	86
5.1 掺杂光纤	86

5.2 光纤激光器	88
5.3 掺铒光纤放大器	95

第二部分 网络技术的应用

第6章 光纤通信系统	101
6.1 光纤通信系统的组成	101
6.2 光纤通信系统的调制与解调	102
6.3 IM-DD 系统及应用	106
6.4 相干光波系统	110
6.5 光孤子通信	112
6.6 SCM 系统	115
6.7 光纤通信系统的设计	118
第7章 光复用技术	123
7.1 光波分复用	123
7.2 光时分复用	127
7.3 光码分复用	131
第8章 光交换技术	135
8.1 光交换元件	135
8.2 光路交换	140
8.3 光分组交换	145
第9章 计算机互联光网	147
9.1 光网络的分层结构	147
9.2 CSMA/CD 光纤总线网	149
9.3 光纤分布式数据接口 (FDDI)	156
9.4 光纤通道	163
第10章 光接入网	167
10.1 接入网概述	167
10.2 光纤接入网	168
10.3 无源光网络	172
10.4 光纤同轴混合网 (HFC)	179
第11章 光纤通信测量	187
11.1 光纤测量中的常用仪器	187
11.2 测量的基础知识	194
11.3 光纤特性的测量	201
11.4 光纤数字传输系统特性的测量	223
11.5 光缆线路工程测量	226
附录A 常用英文缩写文字符号对照	242
附录B 参考文献	255

第一部分

基 础 篇

光纤通信原理及应用

第 1 章 绪 论

近年来, 光纤通信技术发展迅速, 已经成为通信领域一个耀眼的亮点。光纤通信是以光波作为信息的载体, 以光纤作为信道的一种通信方式, 它以频带宽、容量大、不受电磁干扰、成本低等独特的优点迅速成为各种通信网络的主要传输方式。

1.1 光纤通信的发展过程

通信, 即信息传递的术称, 如同货物的运输, 信息相当于货物, 它可以通过各种媒介 (相当于各种运输工具) 来传递。远古时代人们用烽火来传递敌情信息, 后来人们用旗帜、信号灯以及其他的信号装置来传递一些简单的信息。这些通信方式速度慢, 可靠性差。

19 世纪 30 年代出现了电报, 开始了以电波作为信息载体的电信时代。电通信技术的出现使得通信技术有了质的飞跃, 它可以高速度地传输比较复杂的信息, 如传输语音信息的有线和无线电话、广播、电视等。100 多年来, 电通信给人们的通信带来了极大的方便。然而, 电通信技术的发展远不能满足人们对信息日益增长的需求, 至 20 世纪 70 年代, 电通信的容量 BL 积还不超过 100 (Mbit/s) km。这还不够, 人们研究发现, 利用光作为信息载体将使通信容量提高几个数量级。

1966 年英籍华人高琨 (C. K. Kao) 博士提出了利用光纤通信的设想。1970 年小型半导体激光器和低损耗光纤几乎同时问世, 由此便开始了光通信时代。

光纤通信是以光波作为信息载体。光波实际上是人们所熟悉的电磁波, 其波长在微米级, 频率为 $10^{12} \sim 10^{16}$ Hz 数量级。从电磁波谱中可以看出, 紫外线、可见光、红外线均属于光波。目前光纤通信使用的光波波长范围是在近红外区, 波长范围为 $0.8 \sim 1.8 \mu\text{m}$, 如图 1-1 所示。

光纤通信的发展大体上经历了以下几个阶段:

第一代光纤通信系统出现在 20 世纪 70 年代, 当时是以波长为 $0.85 \mu\text{m}$ 的多模光纤为主, 比特率为几十 Mbit/s, 中继距离为 10km 左右, 但与同轴电缆相比, 其中继距离长, 投资和维护费用低。

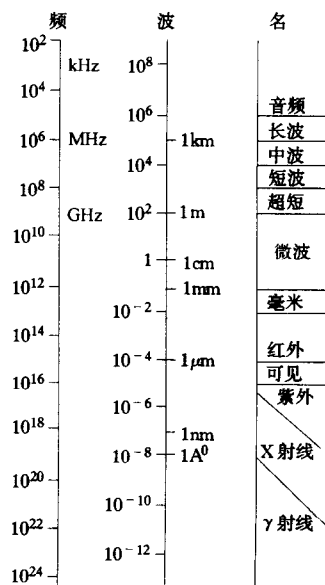


图 1-1 电磁波频谱

第二代光纤通信系统出现在 20 世纪 80 年代初, 这时是以波长为 $1.31\mu\text{m}$ 的单模光纤为代表, 其比特率可达 1.7Gbit/s , 中继距离约 50km 。

第三代光纤通信系统在商业上应用是在 20 世纪 90 年代初, 采用的是低损耗的波长 $1.55\mu\text{m}$ 的光波系统, 通过精心设计激光器和光接收机, 第三代光纤通信系统比特率可达 4Gbit/s , 中继距离可达 100km 左右。

第四代光纤通信系统是以采用光放大器增加中继距离和采用波分复用技术来增加比特率和中继距离为特征, 由于这种系统有时采用零差或外差方案, 故又称为相干光波通信系统。在第四代光纤通信系统中, 光纤损耗用光纤放大器 (EDFA) 补偿, 补偿后可传输数千千米。光纤放大器的问世, 引起了光纤通信领域的重大变革。

第五代光纤通信系统基于非线性压缩抵消光纤色散展宽, 实现光脉冲信号保形传输。即所谓的光纤孤子通信。

光纤通信系统五代发展进程如图 1-2 所示。

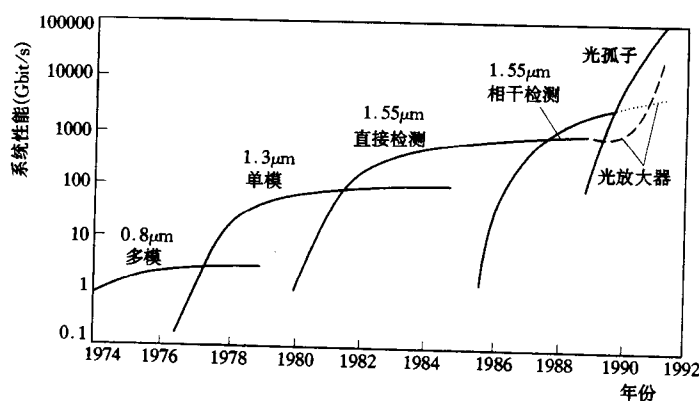


图 1-2 光纤通信技术发展示意图

光纤通信相对于电通信具有其独特的优点：

(1) 通信容量大, 传输频带宽。通信系统的通信容量是人们不断追求的目标, 根据信息理论, 载波频率越高, 通信容量越大。目前使用的光波频率比微波频率高约 $10^4 \sim 10^5$ 倍, 所以其容量也可增加约 $10^4 \sim 10^5$ 倍。

(2) 不受电磁干扰。由于光纤是非导电介质材料, 它几乎不受电磁干扰。

(3) 投资省。光纤主要原料是玻璃, 其资源丰富, 相对价格十分便宜, 可节省大量的投资。此外, 光纤还有重量轻、损耗低、抗化学腐蚀等优点。但光纤也有机械强度低, 连接、分路耦合困难等缺点。

光纤通信技术自 20 世纪 70 年代问世, 短短不到 30 年间, 取得了令人意想不到的飞速发展。光纤被认为是具有“取之不尽”的带宽资源, 近年来, 光纤的传输容量几乎每年翻一番。世界通信业务的主体要经过光纤传输, 目前通信网络正由传统的电网, 经过光电混合网络向第三代通信网络——全光网络发展。在全光网络中不仅传输在光域进行, 交换、复用、控制以及路由选择全部在光域进行, 可进一步增加通信速率, 增强开放性。

1.2 光纤通信系统的组成

光纤通信系统由光发送机、光接收机、光纤光缆以及其他连接和光处理器件等组成。如图 1-3 所示。

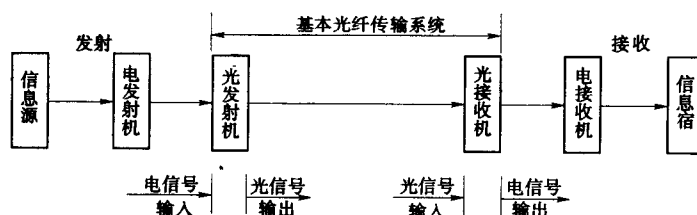


图 1-3 光纤通信系统的基本组成

光纤是光纤通信系统的基本单元，作为传输介质提供通信信道，信号以光的形式通过光纤传至目的终端。光纤的基本特性参数是损耗和色散，损耗影响通信距离，色散影响通信容量，也影响通信距离。在通信系统中，总是希望光纤具有低损耗和较低的色散特性。除此之外，还希望光纤有比较好的机械特性和环境特性。

光纤按传输模式主要可分为多模和单模光纤两大类。多模光纤损耗色散比较大，一般用于低速短距离通信系统中，工作波长也在短波范围，长 $0.8\mu\text{m}$ 或 $1.31\mu\text{m}$ ，单模光纤工作波长一般为 $1.31\mu\text{m}$ 或 $1.55\mu\text{m}$ 。单模光纤的传输特性比多模光纤的传输特性要好，价格也便宜，因而得到更为广泛的应用。单模光纤配合半导体激光器，适合大容量长距离使用，而小容量短距离系统用多模光纤配合发光二极管使用更加合适。

根据 CCITT 建议光纤的类型与应用如表 1-1 所示。

表 1-1

光纤的类型与应用

应用	局内通信	局间通信				
		短距离		长距离		
光波波长 (nm)	1310	1310	1550	1310	1550	1550
光纤类型	G. 652	G. 652	G. 652	G. 652	G. 652 G. 654	G. 653
传输距离 (km)	≤ 2	≈ 15	≈ 15	≈ 40	≈ 60	≈ 60

1. 光发送机

光发送机的功能是将由 PCM 复用设备输入的电信号转换为光信号送入光纤传输。它主要由光源、驱动器和调制器等组成。光源是光发送机的关键器件，它决定光发送机的性能特性，要求光源有足够大的输出功率，足够高的调制频率，谱线宽度和光束发散角尽可能小，输出功率和波长稳定，工作可靠，寿命长（一般要求 10 万 h 以上）。目前广泛使用的光源有半导体发光二极管和半导体激光二极管，以及动态单纵模分布反馈激光器等。

光发送机将电信号转换为光信号的过程常简称为 E/O 转换。由光源发出的光波要在

调制器中受到电信号的调制，形成已调光波。调制的方法有直接调制和间接调制两种。

直接调制又称直接强度调制 (IM)，是用电信号对光源的注入电流进行调制，使其输出光波的强度随调制信号变化而实现的。其特点是光源和调制器可以做成一体。直接调制技术简单、成本低、容易实现，是目前实用光纤通信系统广泛使用的调制方式。由于激光器的频率特性限制，直接调制速度不高。

间接调制多为外调制，其主要特点是光源和调制器分开，用独立的调制器调制激光器的输出光。已有多种间接调制方式，如电光调制、声光调制和磁光调制等。目前技术上较为成熟的是电光调制。电光调制利用晶体电光效应，光源产生的光波通过用光电晶体制成的电光调制器，电信号加在调制器上改变晶体的折射率，使之对光波进行调制。电光调制可以实现强度调制、相位调制和偏振调制。间接调制的优点是调制速度高，对调制的光源的工作不产生影响，但设备较为复杂，一般在要求有很高的调制特性下使用。

2. 光接收机

光接收机的功能是把从光纤中输出的，可能已产生畸变和衰减的微弱光信号转换为电信号，并经过放大和处理还原为原来发送前的信号。光接收机由光检测器、放大器和相关电路组成。光检测器是光接收机的核心，要求响应度高、噪声低和响应速度快。目前广泛使用的光电检测器主要有 PIN 光电二极管 (PIN-PD) 和雪崩光电二极管 (APD) 两类。前者是无增益的，后者是有增益的。由于半导体材料对不同波长有不同的响应度，因此在短波长段广泛使用硅雪崩光电二极管，在长波段广泛使用锗雪崩光电二极管或 PIN 光电二极管。

光接收机将光信号转换为电信号的过程常简称为 O/E 转换，是通过光检测器的检测实现的。通常有两种检波方式即直接检波 (DD) 和外差检波 (CD)。直接检波是用检测器直接把光信号转换为电信号。这种方式设备简单，经济实用，是当前光纤通信系统普遍采用的接收方式。外差检波方式是用光接收机产生一个本地振荡光波，与光纤输出的光波信号在光混频器中差拍产生中频信号，经光电检波器变换为中频电信号。此种方式的优点是光接收机具有很高的接收灵敏度，但设备比较复杂，对光源的频率稳定性和光谱宽度要求很高。它是一种未来很有发展前途的检波方式。

光接收机的重要特性参数是灵敏度，它反映接收机调整到最佳状态时接收微弱光信号的能力。灵敏度主要取决于组成光接收机的光电二极管和放大器的噪声，并受传输速率、光发送机的参数和光纤线路的色散的影响，还与系统要求的误码率或信噪比有密切的关系。所以，灵敏度也是反映光纤通信系统质量的重要指标。

1.3 光纤通信中的码型

1.3.1 线路编码

在数字通信中，传输码型的选择也是不可忽视的问题。在脉码调制 (PCM) 通信系统中，从电端机输出的是适合于电缆传输的双极性码 (如三阶高密度双极性码 HDB₃ 和传号反转码 CMI)，而这些码型并不都适合光纤通信系统中的传输，例如，HDB₃ 码有 +1、-1 和 0 三种状态，而在光纤通信系统中，光源只有发光和不发光两种，即无法表

示发负脉冲的状态。因此,在光纤通信系统中无法传输 HDB_3 码,因此,光发射机必须将 HDB_3 解码,变为单极性的二值电平码“1”和“0”。简单的二值电平码虽然简单,但在实用中将会带来许多急需解决的问题,如:

(1) 光接收机的判断带来困难。在码流中,出现“1”码和“0”码的个数是随机变化的,因而直流分量也会发生随机性的波动(基线漂移),给光接收机的判断带来困难。

(2) 定时提取困难或定时误差大。在随机码流中,容易出现长串连“1”码或长串连“0”码,这样可能造成位同步信息丢失,给定时提取造成困难或产生较大的定时误差。

(3) 不能实现在线(不中断业务)的误码检测,不利于长途通信系统的维护。

为了解决上述问题,即避免信码流中出现长“0”码和长“1”码,尽量减少信码流中直流分量的起伏,实现不间断地进行误码检测等,同时还需增加一些其他功能,如传输监控信号、区间通信信号、公务通信信号、数据通信信号等,都需要重新编码。在光纤通信系统中,常用的线路码型有伪双极性码、 $mBnB$ 码、插入比特码和加扰二进制码。

1.3.2 常用码型

1. $mBnB$ 码

$mBnB$ 又称为分组码(Block Code),即把输入的二进制的原始码流进行分组,每组有 m 个二进制码,记为 mB ,称为一个码字,然后把一个码字变换为 n 个二进制码,且 $n > m$ (一般选取 $n = m + 1$),记为 nB 。可见,变换后以码组的比特数比变换前大。这就是说,使得变换后的码流有了冗余,有了它,在码流中除了可以传送原始信息以外,还可以传送与误码检测有关的信息,同时,经适当的编码后还可以改善定时信号的提取和直流分量的起伏问题。 $mBnB$ 码有 $1B2B$ 、 $3B4B$ 、 $5B6B$ 、 $8B9B$ 、 $17B18B$ 等,目前常用是 $5B6B$ 码。

2. 伪双极性码(CMI和DMI)

所谓伪双极性码就是用“11”和“00”来代表双极性码中的+1和-1的码型。常用的有传号反转码 CMI(Coded Mark Inversion)和不同模式反转码 DMI(Differential Mode Inversion)。CMI 用“01”表示 0,DMI 用“01”或“10”表示 0 状态(在+1后用“01”,在-1后用“10”)。

使用伪双极性码可使信码流中的“1”和“0”出现的概率均等,从而消除信码流中直流分量的起伏。

3. 插入比特码

插入比特码是将信码流每 m 比特(mB)划为一组,然后在每组 mB 码末尾按一定的规律插入一个码,组成 $m+1$ 个码为一组的线路码流。根据插入码的功能不同,这种码型又可分为 $mB1C$ 、 $mB1P$ 、 $mB1H$ 码。

(1) $mB1C$ 码。 $mB1C$ 码是在 mB 码末尾插入一个反码,称 C 码。C 码的编码原理是:如果第 m 位码为“1”码,则插入“0”码,反之插入“1”码。它的功能是,可以进行误码监测和减少长串连“1”码或长串连“0”码的不良影响。

(2) $mB1P$ 码。 $mB1P$ 码是在 mB 码末尾插入一个奇、偶校正码,称为 P 码。P 码的编码原理是:保证每个码组内“1”码的个数为偶数,即 mB 码中的“1”码个数为奇数时,在 mB 码末尾插入一个“1”码,反之插入“0”码。由于 $mB1P$ 码中“1”码的个数是偶数,因此,可以通过监测码流中的“1”码的奇偶状况来进行误码监测。

(3) *mB1H* 码。*mB1H* 码是 *mB1C* 码演变而成的, 即在部分 *mB1C* 码中扣除 *C* 码, 而插入一个混合码, 称为 *H* (Hybrid) 码。*H* 码的编码原理从略。这种码型具有多种功能, 它除了可以完成 *mB1C* 码和 *mB1P* 码的功能外, 还可同时用来做若干路区间通信、公务联络、数据传输等。

4. 加扰二进制码

为了使传输的信息码流接近序列, 以防止长连“0”码和长连“1”码的情况出现, 常在系统光发射机的调制器前附加一个扰码器, 将原始的二进制码序列加以变换, 即所谓的加扰二进制码。加扰二进制码是最适用的线路码型, 它不仅从统计特性上解决了长连“0”码和长连“1”码问题, 而且还可以把直流成分保持在一定的水平。可见它解决了定时信息的提取和基线漂移两个问题, 而且增加了信息的码率。这一点对于光接口标准化有特殊意义, 因此在新一代的光同步传输网 (SDH) 中得到了广泛应用。

1.4 全光网络的概念

全光网络本质上讲是指信号在端到端的通信过程中都保持光的形式 (全光通路), 中间不需要经过光电或电光转换, 节点也是光节点, 数据从源节点到目的节点都在光域内进行传输。这样就避免了光纤通信中的电子瓶颈, 通信速度可以大幅度地提高。

1.4.1 三代通信网络

全光网络被认为是第三代通信网络。它是在第一代电网络和第二代光电混合网络的基础上发展起来的。

早期的第一代电网络是采用电线和电缆将网络上的节点连在一起所构成的, 电网络受本身电子器件物理极限的限制存在时延大、速度慢、传输距离短和易受各种电磁干扰等缺点。

第二代光电混合网络是在网络节点之间用光纤取代了电线和电缆, 信号以光电混合的方式传输, 实现了信号的部分光域化。相对于电网络, 光电混合网络具有通信容量大、抗电磁干扰和传输距离远等优点。目前的通信网络主要是光电混合网络。

全光网络以光节点取代电节点, 实现端到端全程光信号传输。这种网络只在接收机和发射机里进行光电或电光转换, 网络内不需要进行光电或电光转换。一个节点只包含本节点的电子信息, 而与其他节点信息无关, 不为其他节点传输或处理信息服务。全光网络具有比传统的电网络和光电混合网络通信容量大、可管理性强等优点, 并且全光网络本质上是透明的, 可对不同速率、协议、调制频率和制式兼容, 允许几代设备共存于同一个光纤基础设施。近年来, 由于 WDM 技术的成熟并大量商用, 国际上已经掀起了一个研究全光网络的热潮。

1.4.2 全光网络的关键技术

全光网络的概念提出较早, 也是未来通信网络的发展方向, 但是目前完全实现全光网络还有较多困难, 其中存在的关键性的技术问题主要有光复用技术、光交换技术、全光中继技术和光互联技术等。

(1) 光复用技术。光复用技术是全光网络的最重要的关键技术之一。它直接决定系统

的传输容量，是实现网络超大容量传输的必经之路，目前提出的全光复用技术主要有波分复用、时分复用、码分复用等。

波分复用 WDM 是比较成熟的技术，目前已有相当多的 WDM 系统投入商用。如 $8 \times 2.5\text{Gbit/s}$ ， $16 \times 2.5\text{Gbit/s}$ ， $8 \times 10\text{Gbit/s}$ ， $16 \times 10\text{Gbit/s}$ 等系统，它是解决在同一根光纤中同时传输多个光载波信号的问题。两个波长同时传输称为波分复用 WDM，多个波长（8~16 个波长）同时传输称为密集波分复用 DWDM，很多个波长同时传输则称为频分复用 FDM。现在一般也称密集波分复用 DWDM 为波分复用 WDM，而频分复用则目前技术不够成熟。

时分复用 OTDM 是解决在同一根光纤中利用一根光载波在不同时域内传输不同的通道信号的问题。它避开了在电域进行更高速率复用所受到的限制，采用光脉冲压缩、光脉冲时延、光放大、光均衡、光色散补偿、光时钟提取、光再生等一些列技术在时域里复用和解复用。目前已有许多成功的试验。

OCDMA 即光码分复用是利用正交码的自相关和互相关方面的特性，在同一波长，在相同时间内将不同码址的光信号复用和解复用。该技术是正在发展中，并有发展潜力的光复用技术。

以上各种复用技术各有优势，相互之间有互相补充之处，应用中可将它们相互结合，一起使用。如将 DWDM 和 OTDM 结合，则可以有更大的系统容量和速率，而在每个时隙采用 OCDM，然后进行 OTDM，最后进行 DWDM 则总速率可达数十 Tbit/s，从而可以充分地利用光纤巨大的带宽资源。

(2) 光交换技术。光交换技术是全光网络的另一关键技术。目前光纤通信系统大多采用光传输电交换，需经过 O/E、E/O 转换，这种方式设备价格贵，交换速度低。采用光交换是未来的必然趋势，但由于光逻辑器件的功能还比较简单，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。

光交换技术可以分为光路交换和光分组交换，光路交换分为空分、时分、波分交换以及由这些交换形式组合而成的结合型。光分组交换中，异步转移模式是近年来广泛研究的一种形式。

(3) 全光中继技术。在传输方面光纤放大器是全光网络的核心技术之一。掺铒光纤放大器 (EDFA) 的出现迅速取代了电的信号再生放大器，在光纤传输中，省去了电的环节，大大简化了整个光传输网，是 DWDM 发展的关键要素之一。

由于传统的 EDFA 可用的带宽只有 30nm，使得 DWDM 系统的容量受到限制，最新研制的基于二氧化硅和掺铒的双波段光纤放大器则可使 DWDM 系统的带宽增加一倍以上。

1.4.3 全光网络的优点

相对于电网络而言，全光网络具有以下优点：

(1) 充分挖掘光纤巨大的带宽资源，增大传输容量，且与现有的网络具有良好的兼容性。

(2) 全光网络结构简单，端到端采用透明光通路连接，沿途没有光电转换和存储，网络中许多光器件都是无源的，便于维护，可靠性高。

(3) 全光网络具有可扩充性和可重构性。网络中使用了 OXC，加入新的网络节点时不影响原有的网络结构和设备，从而可降低成本，当用户通信量增加或网络出现故障时可以改变 OXC 的连接方式，对网络进行重构。

(4) 全光网络以波长选择路由，各个连接通过承载信息的波长来识别，因此对传输码率、数据格式及调制方式均具有透明性。可提供多种协议业务，可不受限制地提供端到端业务。