



光通信中的光电子器件讲座

第四讲 光通信中的波分复用技术及关键器件的原理和应用

王传林 余重秀 忻向军

(北京邮电大学电子工程学院光电子与光波技术研究中心 北京 100876)

辛 港 杨晓强

(瞬联软件科技有限公司 北京 100080)

摘 要 通信业务的爆炸式发展,使得通信网络对传输容量要求急剧提高.WDM(wavelength division multiplexing)技术是增加系统容量的有效方法.文章介绍了光通信中波分复用技术的基本原理和特点以及波分复用技术中所用的关键器件——波分复用器/解复用器.

关键词 波分复用,频分复用,波分复用器/解复用器,光通信

WAVELENGTH DIVISION MULTIPLEXING AND THE KEY COMPONENTS FOR OPTICAL TELECOMMUNICATION

WANG Chuan-Lin YU Chong-Xiu XIN Xiang-Jun

(School of Electronics Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

XIN Gang YANG Xiao-Qiang

(Shunlian Software Science and Technology Ltd., Beijing 100080, China)

Abstract Wavelength division multiplexing(WDM) as a kind of optical multiplexing technology which can effectively increase the transmission capacity of optical communication systems is being developed and applied extensively. The basic concepts, characteristics and key components of WDM are described.

Key words frequency division multiplexing, wavelength division multiplexing, multiplexer/demultiplexer, optical communication

1 引言

随着国民经济的持续增长,信息交流的日益增多,通信业务已从单一的话音业务逐步过渡到语音、图像、数据、多媒体宽带综合业务,社会对通信建设的发展提出了更高的要求.特别是20世纪90年代以来,Internet业务在全球范围爆炸式发展,刺激了全球通信业务的疯狂增长,而这种疯狂增长的最直接的后果是出现了所谓的“光纤耗尽”现象——埋下去的光纤都用完了.

就建设资金而言,光纤通信系统的初期投资是非常大的,主要是因为光缆线路的敷设费用非常高,那么如何利用现有的光缆系统最大限度地扩大传输容量呢?

传统的扩容方法是采用时分复用(TDM)方式,

即把电信号在时间轴上按一定的时间间隔复用起来传输.据统计,当系统速率不高于2488Mbit/s时,系统每升级一次,每比特的传输成本下降30%左右.但是随着现代电信网对传输容量要求的急剧提高,利用TDM方式已日益接近硅和砷化镓技术的极限,而且传输设备的价格也很高,光纤色散的影响也日益严重.因此,人们越来越多地把兴趣从电时分复用方式转移到光复用,即从光域上用波长复用的方式来提高传输效率,增加传输容量.WDM系统是20世纪90年代末期国际上商用的大容量光通信产品,它能适应快速增长的数据通信业务的需求.WDM从提出到今天,短短数年,一直保持着强劲的增长势头,WDM技术已趋于成熟,而且越来越成为现代通信系

* 2001-11-21 收到初稿 2002-03-04 修回

2 光纤的基本特性

从光纤通信的发展来看,所应用的技术都与光纤密切相关,因而在深入探讨 WDM 技术以前,有必要讨论一下光纤的特性,特别是光纤的带宽和损耗特性.

通信光纤由二氧化硅制成,光纤的衰减也由二氧化硅的衰减特性决定.图 1 表明了二氧化硅衰减同波长的关系.

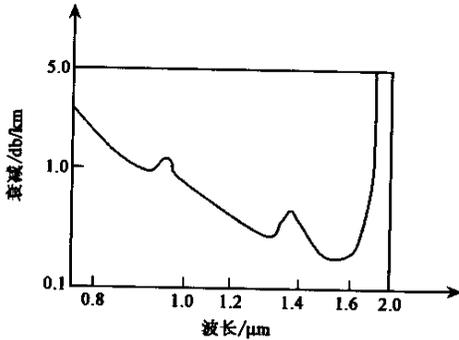


图 1 二氧化硅光纤衰减同波长的关系曲线

从图 1 可以看出,除了由于光纤材料中 OH 根离子导致的吸收峰处损耗较大外,其他区域光纤损耗都较小.850nm,1310nm 和 1550nm 左右是光纤通信中常用的低损耗窗口.850nm 窗口是最早开发的,因为首先研制的半导体激光器发射波长刚好在这一区域.随着对光纤损耗机理的深入研究,人们发现长波长(1310—1550nm)光纤的损耗更小,因此,长波长光纤通信受到重视并得到迅速发展.

原有的光纤通信系统只在一根光纤中传输一个波长信道,而光纤本身的长波长低损耗区域很宽,有很多波长可以利用.如现在通信中人们利用的只是光纤低损耗频谱(1310—1550nm)极少的一部分,就是利用掺铒光纤放大器 EDFA 放大区域(1530—1565nm)的全部带宽(35nm 带宽),也只是占用光纤全部带宽的 1/6 左右,因而目前光纤的带宽远远没有充分利用.

WDM 技术的出现可以充分利用这一带宽.理论上,WDM 技术可以利用的单模光纤带宽达到 200nm.按波长间隔 0.8nm 计算,可开通 200 多个波长,这将使一根光纤的传输容量比单波长增加几十倍至几百倍.

3 WDM 技术原理

WDM 是根据一定的频率(或波长)间隔将光纤的低损耗窗口划分为若干个信道,每个波长信道占用一段光纤的带宽,如图 2 所示.

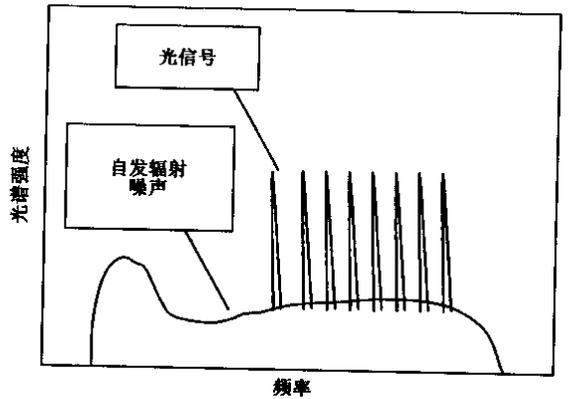


图 2 WDM 系统的频谱分布

在每个波长的信道上运行一个系统(各个系统和传输速率可以是一致的,也可是不一致的).这样,通过增加工作波长的数量,达到增加传输容量的目的.

在发送端,利用光波作为载波,用波分复用器(合波器)将承载不同信号的不同波长的光载波合并起来送入一根光纤进行传输.在接收端,由解复用器(分波器)将不同波长的光载波分开来分别接收.由于不同波长的光载波相互独立(不考虑光纤的非线性时),从而在一根光纤中可以实现多路光信号的复用传输.图 3 给出了 WDM 系统组成原理图.

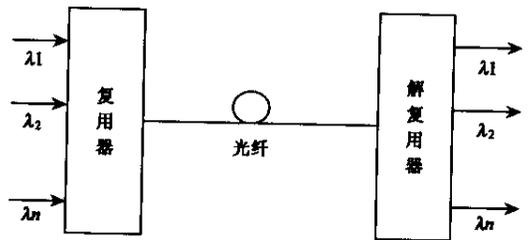


图 3 WDM 系统原理图

波分复用也被称为光频分复用.在有些场合,只将波长间隔较大的称为波分复用,而将波长间隔在 1nm 以下或者频率大于 100GHz 的称为频分复用或密集波分复用(DWDM).本文用 WDM, DWDM 分别表示波分复用和密集波分复用.

可以看出,WDM 技术主要有如下特点:

(1)可以充分利用光纤的巨大带宽资源,使一根光纤的容量比单波长传播增加几十倍;

(2)使多个波长在一根光纤中传输,可以大大节

约光纤和其他相关器件.另外,对早期安装的芯数较少的光缆,利用 WDM 技术可以比较方便地进行扩容而不必对原有系统做大的改动;

(3)由于同一光纤中传输的信号波长彼此独立,因而可以透明地传输电信业务类型完全不同的各种信号;

(4)利用 WDM 技术选路来实现网络交换和恢复,从而可能实现未来透明的具有高度生存性的光网络.

4 WDM 传输系统中的波分复用器/解复用器

光波分复用器和波分解复用器在 WDM 系统中起着关键作用,其性能对系统的传输质量有决定性的影响.

将不同光源的波长信号复合在一起的器件称为复用器,反之,经同一传输光纤送来的多波长信号分解为各个波长分别输出的器件称为解复用器.复用器和解复用器原理一样,根据光路可逆原理,只要将复用器的输出端和输入端反过来使用,就是解复用器.

根据分光原理的不同,现有的基本波分复用器可分为干涉膜型、衍射光栅型、光纤光栅型、阵列波导型、熔融型五种.下面分别介绍.

4.1 干涉膜型波分复用器

干涉膜型波分复用器又称介质膜型波分复用器,是目前实现 WDM 最常用的器件.它利用薄膜滤光片对不同波长有不同的透射率特性(大约在 0—90% 范围内变化),把光分为透射光和反射光,从而达到合波和分波的作用.膜层结构如图 4 所示, H, L 为光学厚度是 $1/4$ 波长的高、低折射率膜层.

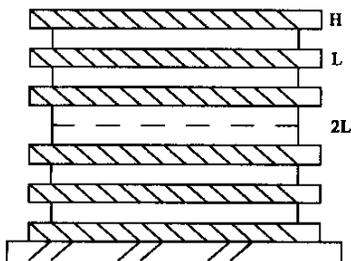


图 4 多层介质膜

由图 4 可见,中间层 $2L$ 为 $1/2$ 波长 λ_0 的光学厚度,对波长为 λ_0 的光不起作用,可以略去不计,剩下的中间层为 HH,同样可以略去不计,依次类推.可以看出,整个膜系对波长 λ_0 的光有同基底一样的透

射率,而对波长偏离 λ_0 的光因为中间层不满足半波长的条件,因而透射率迅速下降,于是就构成了波长 λ_0 的滤波器.

由于干涉滤光片的波长间隔不易做得很窄,为防止串扰,被分割的两路波长不能靠得很近,所以干涉膜型波分复用器的复用路数一般要受到限制.这种波分复用器由于技术成熟,器件性能很好,温度稳定性好,通道隔离度高,插入损耗低,因而广泛应用于通道数目较小的系统.

4.2 衍射光栅型波分复用器

衍射光栅型波分复用器原理如图 5 所示.

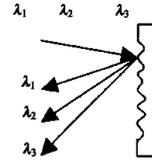


图 5 衍射光栅型波分复用器原理图

它主要利用不同波长的光入射到光栅后其衍射方向各不相同,从而将不同波长的光以不同的角度,定向耦合到各根光纤中去.因而它特别适合于复用波长较多的情况.同时,它又易于做成集成光波导型器件.目前主要有三种应用形式:

(1)低空间频率衍射光栅(小于 400 线/mm):具有非常好的衍射效率,并且几乎与偏振无关,但由于聚焦距离很大,体积一般较大;

(2)高空间频率衍射光栅:可以减小器件尺寸,但同时插入损耗变大,偏振相关性增强;

(3)体全息光栅:利用路径反转的有机聚合物波导制作.这种波分复用器成本低,利用迂回光路体积小,机械性能及抗干扰性较好,同时它可以使使用多模光纤,便于在城域网的小波长数环境中使用;

4.3 光纤光栅型波分复用器

光纤光栅型波分复用器是利用紫外光干涉在光纤中形成周期性的折射率变化,在纤芯中形成周期性光栅,如图 6 所示.



图 6 光纤光栅型波分复用器原理图

当折射率的周期性变化满足布拉格(Bragg)光栅条件时,相应波长的光就会产生全反射,而其余波长的光就会顺利通过,相当一个带阻滤波器.光纤光栅具有理想的滤波特性,易于与光纤连接,连接损耗低,波长、带宽以及色散可以灵活控制,便于设计制

造成本低、效率高等优点. 尽管光纤光栅型波分复用器具有美好的发展和应用前景, 但也存在不足之处. 如在组成实际的 WDM 时, 需要用到价格昂贵的光环形器或马赫-曾德干涉仪, 且随信道增加, 系统的复杂性和成本也随之增加, 另外, 这类器件对温度敏感, 需要进行温度控制.

4.4 阵列波导型波分复用器

阵列波导光栅是通过标准的集成光学工艺, 在硅、磷化铟甚至有机聚合物上制作而成的. 它的结构如图 7 所示. 它由多路输入输出波导、两个平板型波导以及阵列波导构成. 阵列波导一般有几百条, 相邻两个波导路长差 ΔL , 这种结构产生的波长相关相移使阵列波导呈衍射光栅的特性. 当 N 个波长的信号从输入端进入, 由于阵列波导中引起的相位差产生色散, 对应各波长在不同输出波导聚光, 从而达到解复用的目的. 由于各个单个器件不是直接相连, 在这种复用器中, 即使大规模增加波路, 损耗几乎也保持一定, 因而它适用于多波长通道的高度集成.

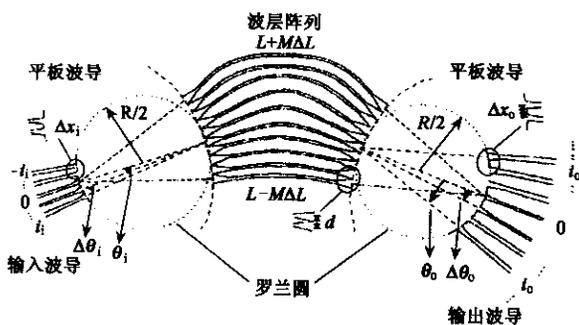


图 7 阵列波导型波分复用器原理图

4.5 熔融型波分复用器

这是一种历史微老的老方法, 利用的是大家熟知的熔融马赫-曾德干涉仪. 单模光纤的马赫-曾德干涉仪原理图如图 8 所示, 它是在两条相同的单模光纤上连续熔拉 C1 和 C2 两个耦合器而成的.

两个输出端功率随波长、 c_1 和 c_2 的分光比以及干涉臂 L_1 和 L_2 的长度差 ΔL 而变化. 通过控制熔融区的拉锥速度, 使臂 1 对波长 λ_1 的光有接近 100% 的光输出, 而对 λ_2 的光输出接近零; 臂 2 对波长 λ_2 的光有接近 100% 的光输出, 而对 λ_1 的光输出

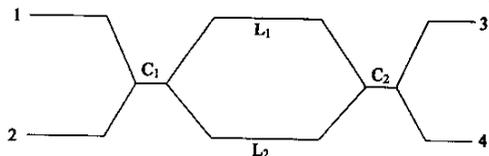


图 8 熔融型波分复用器原理图

接近零. 这样就可以让 λ_1, λ_2 从不同的端口输出, 达到分波的目的.

综上所述, 这几种波分复用器各有优缺点, 但对于当今具体的 WDM 系统而言, 干涉膜型和光纤光栅型两种波分复用器显然更加实用, 涉及的技术和设备相对简单, 成本适中, 可重复性好, 是目前最有希望应用于 DWDM 的器件. 前者的典型波长数是 2, 4 和 8, 后者的为 8, 16 甚至为 32. 就目前实际系统来说, 应用最多的是干涉膜型复用器. 阵列波导型复用器是正在研究的被认为最有前途的 DWDM 器件. 随着 WDM 技术的发展, 超大容量的密集波分复用器是光纤通信领域研究的热点. 近年来, 各国都在竞相研制一些新型的波分复用器件. 其中比较典型的有:

- (1) 集成光学或全光纤级联马赫-曾德干涉型;
- (2) 波导阵列光栅型;
- (3) 声光调谐滤波型;
- (4) 光纤法布里-珀罗型

尽管各国专家对这些器件进行了多年的研究, 器件性能也在不断提高, 但其在商用系统中的应用却很少. 主要是因为它们在应用中还存在一些缺点, 如制造工艺复杂、成本高、插入损耗大、偏振相关, 以及安装灵活性差、连续性差等一系列的问题.

就目前情况看, WDM 器件的研究和开发水平明显低于系统应用的要求. 随着 WDM 系统的迅猛发展, 需要更高质量和更高密集度的 WDM 器件.

5 结语

过去的扩容升级方式是在电信号上采用时间分割的复用方式, 光电器件和光纤完成的功能只是光电交换和传输, 对信号在光域没有进行任何处理. WDM 技术的应用把复用方式从电信号转移到光信号. 在光域上用波分复用的方式实现了光信号直接复用和放大, 提高了传输速率, 并且各个波长彼此独立, 对传输的数据格式透明. 因此, 从某种意义上说, WDM 技术的应用标志着光通信时代的真正到来. 本文介绍了 WDM 技术的基本原理、特点以及波分复用器/解复用器的基本工作原理. 利用 WDM 技术可以充分利用光纤的低损耗带宽, 实现超大容量的信息传输. 国内外许多著名的研究机构都在进行这方面的研究工作, 并已取得许多成果. 最近还有一种光纤技术获得突破, 即可以把 1000 条信道或者波长放进一根光纤. 按这样的发展趋势, 可以预计, 未来 10 年将出现每秒 10^{15} bit 的光纤, 对用户来说, 这种带

宽的容量是无限的,例如传送高质量画面的会议电视,这样的容量绰绰有余,并且成本很低.因此迅捷高速的因特网连接将在不久的将来实现,WDM的应用前景一片光明.

参 考 文 献

[1] 顾晓仪等.全国通信网.北京:北京邮电大学出版社,1999.12—8[Gu W Y *et al.* All Optical Net. Beijing: The Press of Beijing University of Posts and Telecommunications, 1999. 12—8(in Chinese)]

[2] 袁松青等.光纤通信原理.北京:人民邮电出版社,1998.55—13[Yuan S Q *et al.* The Principle of Optical Fiber Communications. Beijing: People's Post & Telecommunications Publishing House, 1998. 55—13(in Chinese)]

[3] 张成良.电信技术,1999,5 [Zhang C L. Telecom. Technology, 1999, 5 (in Chinese)]

[4] 赵仲刚等.光纤通信与光纤传感.上海:上海科学技术文献出版社,1993.207—213[Zhao Z G *et al.* Fiber Communication and Sensor. Shanghai: Shanghai Science and Technology Publishing House, 1993. 207—213(in Chinese)]

[5] 纪越峰.光波分复用系统.北京:北京邮电大学出版社,1999.1—14 [Ji Y F. Wavelength Division Multiplexed System. Beijing: The Press of Beijing University of Posts and Telecommunications, 1999. 1—14, 5(in Chinese)]

[6] 葛文萍等.飞通光电子技术,2001,1 [Ge W P *et al.* Photon Technology 2001, 1 (in Chinese)]

[7] 王怡韵.通讯世界,2002,1:17 [Wang Y Y. Telecom World, 2002, 1: 17(in Chinese)]

· 前沿和动态 ·

长寿命充电电池(Long Life Rechargeable Batteries)

美国能源部 Brookhaven 国家实验室最近研究出一种由镧、镍和锡组成的新合金.用这种合金做成镍/金属氢化物(Ni/MH_x)充电电池的电极后,充电电池具有很多优良的特性,例如贮电量,使用寿命长,能防腐蚀.此外,因为这种合金既不含大多数 Ni/MH_x 电池中所含的昂贵的钴,也不含镍镉电池中含有的有毒金属镉,所以用这种新金属电极做成的充电电池还具有成本低和能环保的优点.

这种合金具有类立方结构,镧原子位于立方晶格格点上,而镍原子在里边.当它用做充电电池电极时,在充电过程中,来自电解液的氢原子贮存在镧原子和镍原子之间的空间,在放电过程中,这些氢原子便释放出来,进入电解液.氢原子进入和离开镧原子和镍原子之间的空间,会产生不良影响.氢原子进入镧原子和镍原子之间的空间时,晶格会膨胀,氢原子离开时,晶格便收缩.因而电池每次充电和放电时,晶格便相应地经历膨胀和收缩.这种膨胀和收缩可导致电极材料粉碎成颗粒,而这种颗粒很易被腐蚀.因此,充电电池的充电次数受到限制,充电电池最终以被腐蚀告终.

为了阻止电极的粉碎和腐蚀, Brookhaven 国家实验室的研究人员想用钴金属化合物来替代镍.但是,考虑到电动车上的充电电池的大小后,发现如用钴金属化合物做电极,成本会非常高.所以研究人员一直在努力,试图通过理解钴所起的作用来找出不含钴的替代品.他们依照镧原子与镍(或锡)原子之

比为 1:5 这个经典配分比来构成合金,并用这种合金做成充电电池的电极.他们发现电池的贮电量增大了,且经过许多次充电和放电后贮电量不变.研究人员对这一结果感到非常惊讶,因为按照 1 个镧原子和 5 个其他原子(镍或锡)之比构成的化合物做成的电极,其贮电能力通常会很快衰减.后来发现,原来他们在操作过程中出了差错,不经意地多加了一点镍/锡化合物,使得镧原子与镍(或锡)原子之比不再是 1:5,而是 1:5.157 了.正是这个微小的组分差别,使电池的特性发生了巨大的变化.以后又用另外的镧原子与镍(或锡)原子之比为 1:5 + 的化合物做了一系列的实验,结果都证实了这种化合物具有以上的优良特性.

研究人员进一步对这种化合物进行了结构分析.他们用强 X 射线照射这种化合物样品,通过测量和分析从样品上散射的 X 射线,来找出在这种原子比为 1:5 + 的化合物中那些额外的原子的去处.分析表明,在这种化合物中,立方晶格格点上的一个镧原子被由两个镍原子构成的哑铃替代了.这种化合物的结构比依照镧原子与镍(或锡)原子之比为 1:5 这个经典配分比构成的化合物更为紧凑.紧凑的结构会使贮氢量稍微降低,因而贮电量亦会减小,但是这种合金被腐蚀的趋势也相应地减小了,亦即其使用寿命延长了.这种新合金的长时间的贮能容量超过了商品电池中钴合金电极的贮能容量.

[李银安摘译自 Energy Science News 2002, 11(12) 4]