

| | | | |
|------|--|------|--|
| 资料编码 | | 产品名称 | |
| 使用对象 | | 产品版本 | |
| 编写部门 | | 资料版本 | |

课程 TC000003 WDM 原理 ISSUE1.0

| | | | |
|-----|--|-----|--|
| 拟制: | | 日期: | |
| 审核: | | 日期: | |
| 审核: | | 日期: | |
| 批准: | | 日期: | |



华为技术有限公司

版权所有 侵权必究



修 订 记 录

| 日期 | 修订版本 | 作者 | 描述 |
|----|------|----|----|
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |



目录

| | |
|------------------------|----|
| 课程说明..... | 6 |
| 课程介绍..... | 6 |
| 课程结构..... | 6 |
| 课程目标..... | 6 |
| 相关资料..... | 7 |
| 1 波分复用技术概述..... | 8 |
| 1.1 波分复用光传输技术..... | 8 |
| 1.1.1 波分复用的基本概念..... | 8 |
| 1.1.2 WDM 技术的发展背景..... | 9 |
| 1.2 DWDM 原理概述..... | 10 |
| 1.3 WDM 设备的传输方式..... | 12 |
| 1.3.1 单向 WDM..... | 12 |
| 1.3.2 双向 WDM..... | 12 |
| 1.4 开放式与集成式系统..... | 13 |
| 1.5 WDM 系统组成..... | 13 |
| 1.6 WDM 的优势..... | 14 |
| 1.7 CWDM 简介..... | 15 |
| 1.8 思考题..... | 16 |
| 2 WDM 传输媒质..... | 17 |
| 2.1 光纤的结构..... | 17 |
| 2.2 光纤的种类..... | 19 |
| 2.3 光纤的基本特性..... | 19 |
| 2.3.1 几何尺寸（模场直径）..... | 19 |
| 2.3.2 衰减常数..... | 20 |
| 2.3.3 色散系数..... | 20 |
| 2.4 思考题..... | 21 |
| 3 DWDM 关键技术..... | 22 |
| 3.1 光源..... | 22 |
| 3.1.1 激光器的调制方式..... | 23 |
| 3.1.2 激光器的波长的稳定..... | 25 |
| 3.2 光电检测器..... | 27 |
| 3.2.1 PIN 光电二极管..... | 27 |



| | | |
|-------|--------------------|----|
| 3.2.2 | 雪崩光电二极管 (APD) | 27 |
| 3.3 | 光放大器 | 28 |
| 3.3.1 | 光放大器概述 | 28 |
| 3.3.2 | 掺铒光纤 (EDF) | 29 |
| 3.3.3 | EDFA 增益平坦控制 | 30 |
| 3.3.4 | EDFA 的增益锁定 | 31 |
| 3.3.5 | 掺铒光纤放大器的优缺点 | 33 |
| 3.3.6 | 拉曼光纤放大器 | 34 |
| 3.3.7 | 有关光放大器的技术指标 | 35 |
| 3.4 | 光复用器和光解复用器 | 35 |
| 3.4.1 | 光栅型波分复用器 | 36 |
| 3.4.2 | 介质薄膜型波分复用器 | 38 |
| 3.4.3 | 熔锥型波分复用器 | 39 |
| 3.4.4 | 集成光波导型波分复用器 | 39 |
| 3.4.5 | 波分复用器件性能比较 | 40 |
| 3.4.6 | 对光复用器件的基本要求 | 40 |
| 3.5 | 光监控信道 | 41 |
| 3.5.1 | 光监控通路要求 | 41 |
| 3.5.2 | 监控通路接口参数 | 42 |
| 3.5.3 | 监控通路的帧结构 | 42 |
| 3.6 | 思考题 | 43 |
| 4 | DWDM 光传输系统的技术规范 | 44 |
| 4.1 | ITU-T 有关 WDM 系统的建议 | 44 |
| 4.2 | 传输通道参考点的定义 | 44 |
| 4.3 | 光波长区的分配 | 45 |
| 4.4 | 思考题 | 47 |
| 5 | 专用词汇及缩略语 | 48 |



关键词：

WDM DWDM 光纤 光源 光放大 复用和解复用 光监控信道

摘 要：

本课程主要介绍了波分复用技术的基础知识，并对 DWDM 的主要关键技术、DWDM 光传输技术规范进行了讲解。通过本课程，您可以对 WDM 知识以及光传输网络的发展方向，有一个较全面的了解。。

缩略语清单：

无。

参考资料清单：

- (1) 《光纤通信基础》
- (2) 《密集波分复用技术导论》
- (3) 《DWDM 传输系统原理与测试》
- (4) 《高速光纤通信 ITU-T 规范与系统设计》
- (5) 《城域光网络》
- (6) 《TA052401 光监控信道及其在 DWDM 系统中的应用 ISSUE1.0》
- (7) 《TC000001 光纤与光器件 ISSUE1.0》
- (8) 《TC000002 光放大器 ISSUE1.0》。

课程说明

课程介绍

本课程主要介绍了波分复用技术的基础知识，并对 DWDM 的主要关键技术、DWDM 光传输技术规范进行了讲解。通过本课程，您可以对 WDM 知识以及光传输网络的发展方向，有一个较全面的了解。

课程结构

本课程分为四章：

第一章 波分复用技术概述

这一章内容告诉你什么是波分复用技术，WDM 如何发展而来，WDM 的工作方式和组成形式以及 WDM 的特点。通过本章的学习，可以使我们对于光传输网络前沿技术——WDM 有一个基本的了解。

第二章 WDM 传输媒质

这一章主要介绍光纤的结构、种类和特性。通过这一章的学习使我们对于 G. 652、G. 653、G. 654、G. 655 光纤有一个基本的认识，同时对于色散等概念有一个基本的了解。

第三章 DWDM 的关键技术

如果要把 DWDM 这种新型技术转化为商品，在硬件上如何实现呢？带着这个疑问从本节内容中可以了解到 DWDM 的关键技术以及实现方法，包括光源、光放大和波分复用器件等内容。

第四章 DWDM 光传输系统的技术规范

本章内容主要介绍了 ITU-T 对于 WDM 系统的一些建议以及规范，使我们对于在 WDM 系统中涉及的到的 ITU-T 一些知识有一个基本的了解。

课程目标

- 1.了解 WDM 的一些基本概念及 WDM 的原理、传输方式以及组成；
- 2.了解 WDM 传输媒质；
- 3.了解 DWDM 的技术原理和关键技术实现方法；
- 4.了解 DWDM 光传输系统的技术规范。



相关资料

- (1) 《光纤通信基础》
- (2) 《密集波分复用技术导论》
- (3) 《DWDM 传输系统原理与测试》
- (4) 《高速光纤通信 ITU-T 规范与系统设计》
- (5) 《城域光网络》
- (6) 《TA052401 光监控信道及其在 DWDM 系统中的应用 ISSUE1.0》
- (7) 《TC000001 光纤与光器件 ISSUE1.0》
- (8) 《TC000002 光放大器 ISSUE1.0》

1 波分复用技术概述

(1) 目标：

掌握 WDM 的基本概念。

掌握 WDM 的基本原理、传输方式以及 WDM 的组成。

了解 WDM 的产生背景、技术特点。

1.1 波分复用光传输技术

1.1.1 波分复用的基本概念

光通信系统可以按照不同的方式进行分类。如果按照信号的复用方式来进行分类，可分为频分复用系统（FDM-Frequency Division Multiplexing）、时分复用系统（TDM-Time Division Multiplexing）、波分复用系统（WDM-Wavelength Division Multiplexing）和空分复用系统（SDM-Space Division Multiplexing）。所谓频分、时分、波分和空分复用，是指按频率、时间、波长和空间来进行分割的光通信系统。应当说，频率和波长是紧密相关的，频分也即波分，但在光通信系统中，由于波分复用系统分离波长是采用光学分光元件，它不同于一般电通信中采用的滤波器，所以我们仍将两者分成两个不同的系统。

波分复用是光纤通信中的一种传输技术，它利用了一根光纤可以同时传输多个不同波长的光载波的特点，把光纤可能应用的波长范围划分成若干个波段，每个波段作一个独立的通道传输一种预定波长的光信号。光波分复用的实质是在光纤上进行光频分复用（OFDM），只是因为光波通常采用波长而不用频率来描述、监测与控制。随着电-光技术的向前发展，在同一光纤中波长的密度会变得很高。因而，使用术语密集波分复用（DWDM-Dense Wavelength Division Multiplexing），与此对照，还有波长密度较低的 WDM 系统，较低密度的就称为稀疏波分复用（CWDM-Coarse Wave Division Multiplexing）。

这里可以将一根光纤看作是一个“多车道”的公用道路，传统的 TDM 系统只不过利用了这条道路的一条车道，提高比特率相当于在该车道上加快行驶速度来增加单位时间内的运输量。而使用 DWDM 技术，类似利用公用道路上尚未使用的车道，以获取光纤中未开发的巨大传输能力。

1.1.2 WDM 技术的发展背景

随着科学技术的迅猛发展，通信领域的信息传送量正以一种加速度的形式膨胀。信息时代要求越来越大容量的传输网络。近几年来，世界上的运营公司及设备制造厂家把目光更多地转向了 WDM 技术，并对其投以越来越多的关注，增加光纤网络的容量及灵活性，提高传输速率和扩容的手段可以有多种，下面对几种扩容方式进行比较。

■ 空分复用 SDM (Space Division Multiplexer)

空分复用是靠增加光纤数量的方式线性增加传输的容量，传输设备也线性增加。

在光缆制造技术已经非常成熟的今天，几十芯的带状光缆已经比较普遍，而且先进的光纤接续技术也使光缆施工变得简单，但光纤数量的增加无疑仍然给施工以及将来线路的维护带来了诸多不便，并且对于已有的光缆线路，如果没有足够的光纤数量，通过重新敷设光缆来扩容，工程费用将会成倍增长。而且，这种方式并没有充分利用光纤的传输带宽，造成光纤带宽资源的浪费。作为通信网络的建设，不可能总是采用敷设新光纤的方式来扩容，事实上，在工程之初也很难预测日益增长的业务需要和规划应该敷设的光纤数。因此，空分复用的扩容方式是十分受限。

■ 时分复用 TDM (Time Division Multiplexer)

时分复用也是一项比较常用的扩容方式，从传统 PDH 的一次群至四次群的复用，到如今 SDH 的 STM-1、STM-4、STM-16 乃至 STM-64 的复用。通过时分复用技术可以成倍地提高光传输信息的容量，极大地降低了每条电路在设备和线路方面投入的成本，并且采用这种复用方式可以很容易在数据流中抽取某些特定的数字信号，尤其适合在需要采取自愈保护策略的网络中使用。

但时分复用的扩容方式有两个缺陷：第一是影响业务，即在“全盘”升级至更高的速率等级时，网络接口及其设备需要完全更换，所以在升级的过程中，不得不中断正在运行的设备；第二是速率的升级缺乏灵活性，以 SDH 设备为例，当一个线路速率为 155Mbit/s 的系统被要求提供两个 155Mbit/s 的通道时，就只能将系统升级到 622Mbit/s，即使有两个 155Mbit/s 将被闲置，也没有办法。

对于更高速率的时分复用设备，目前成本还较高，并且 40Gbit/s 的 TDM 设备已经达到电子器件的速率极限，即使是 10Gbit/s 的速率，在不同类型光纤中的非线性效应也会对传输产生各种限制。

现在，时分复用技术是一种被普遍采用的扩容方式，它可以通过不断地进行系统速率升级实现扩容的目的，但当达到一定的速率等级时，会由于器件和线路等各方面特性的限制而不得不寻找另外的解决办法。

不管是采用空分复用还是时分复用的扩容方式，基本的传输网络均采用传统的 PDH 或 SDH 技术，即采用单一波长的光信号传输，这种传输方式是对光纤容量的一种极大浪费，因为光纤的带宽相对于目前我们利用的单波长信道来讲几乎是无限的。我们一方面在为网络的拥挤不堪而忧心忡忡，另一方面却让大量的网络资源白白浪费。

■ 波分复用 WDM (Wavelength Division Multiplexing)

WDM 波分复用是利用单模光纤低损耗区的巨大带宽，将不同速率（波长）的光混合在一起进行传输，这些不同波长的光信号所承载的数字信号可以是相同速率、相同数据格式，也可以是不同速率、不同数据格式。可以通过增加新的波长特性，按用户的要求确定网络容量。对于 2.5Gb/s 以下的速率的 WDM, 目前的技术可以完全克服由于光纤的色散和光纤非线性效应带来的限制，满足对传输容量和传输距离的各种需求。WDM 扩容方案的缺点是需要较多的光纤器件，增加失效和故障的概率。

■ TDM 和 WDM 技术合用

利用 TDM 和 WDM 两种技术的优点进行网络扩容是应用的方向。可以根据不同的光纤类型选择 TDM 的最高传输速率，在这个基础上再根据传输容量的大小选择 WDM 复用的光信道数，在可能情况下使用最多的光载波。毫无疑问，多信道永远比单信道的传输容量大，更经济。

1.2 DWDM 原理概述

DWDM 技术是利用单模光纤的带宽以及低损耗的特性，采用多个波长作为载波，允许各载波信道在光纤内同时传输。与通用的单信道系统相比，密集 WDM (DWDM) 不仅极大地提高了网络系统的通信容量，充分利用了光纤的带宽，而且它具有扩容简单和性能可靠等诸多优点，特别是它可以直接接入多种业务更使得它的应用前景十分光明。

在模拟载波通信系统中，为了充分利用电缆的带宽资源，提高系统的传输容量，通常利用频分复用的方法。即在同一根电缆中同时传输若干个频率不同的信号，接收端根据各载波频率的不同利用带通滤波器滤出每一个信道的信号。

同样，在光纤通信系统中也可以采用光的频分复用的方法来提高系统的传输容量。事实上，这样的复用方法在光纤通信系统中是非常有效的。与模拟的

载波通信系统中的频分复用不同的是，在光纤通信系统中是用光波作为信号的载波，根据每一个信道光波的频率（或波长）不同将光纤的低损耗窗口划分成若干个信道，从而在一根光纤中实现多路光信号的复用传输。

由于目前一些光器件（如带宽很窄的滤光器、相干光源等）还不很成熟，因此，要实现光信道非常密集的光频分复用（相干光通信技术）是很困难的，但基于目前的器件水平，已可以实现相隔光信道的频分复用。人们通常把光信道间隔较大（甚至在光纤不同窗口上）的复用称为光波分复用（WDM），再把在同一窗口中信道间隔较小的 DWDM 称为密集波分复用（DWDM）。随着科技的进步，现代的技术已经能够实现波长间隔为纳米级的复用，甚至可以实现波长间隔为零点几个纳米级的复用，只是在器件的技术要求上更加严格而已，因此把波长间隔较小的 8 个波、16 个波、32 乃至更多个波长的复用称为 DWDM。ITU-T G.692 建议，DWDM 系统的绝对参考频率为 193.1THz（对应的波长为 1552.52nm），不同波长的频率间隔应为 100GHz 的整数倍（对应波长间隔约为 0.8nm 的整数倍）。

DWDM 系统的构成及光谱示意图如图 1-1 所示。发送端的光发射机发出波长不同而精度和稳定度满足一定要求的光信号，经过光波长复用器复用在一起送入掺铒光纤功率放大器（掺铒光纤放大器主要用来弥补合波器引起的功率损失和提高光信号的发送功率），再将放大后的多路光信号送入光纤传输，中间可以根据情况决定有或没有光线路放大器，到达接收端经光前置放大器（主要用于提高接收灵敏度，以便延长传输距离）放大以后，送入光波长分波器分解出原来的各路光信号。

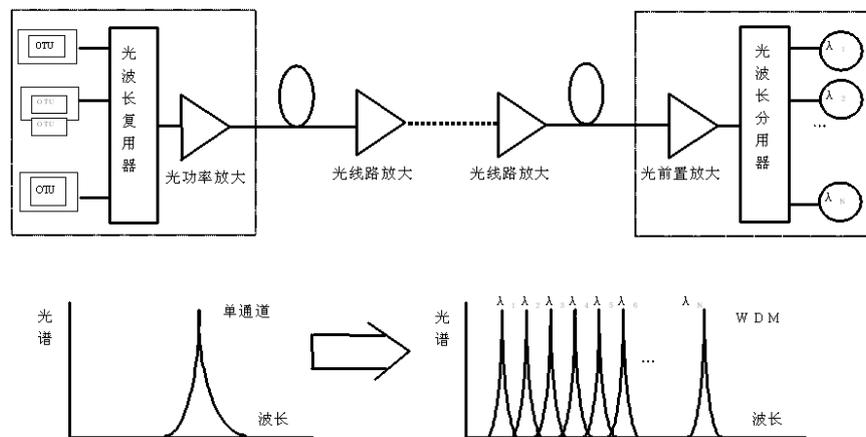


图 1-1 DWDM 系统的构成及频谱示意图

1.3 WDM 设备的传输方式

1.3.1 单向 WDM

如图 1-2 所示，单向波分复用系统采用两根光纤，一根光纤只完成一个方向光信号的传输，反向光信号的传输由另一根光纤来完成。

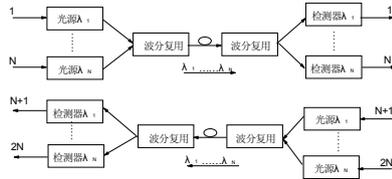


图 1-2 WDM 的单向传输方式

这种 WDM 系统可以充分利用光纤的巨大带宽资源，使一根光纤的传输容量扩大几倍至几十倍。在长途网中，可以根据实际业务量的需要逐步增加波长来实现扩容，十分灵活。在不清楚实际光缆色散的前提下，也是一种暂时避免采用超高速光系统而利用多个 2.5Gbit/s 系统实现超大量传输的手段。

1.3.2 双向 WDM

如图 1-3 所示，双向波分复用系统则只用一根光纤，在一根光纤中实现两个方向光信号的同时传输，两个方向光信号应安排在不同波长上。

单纤双向 WDM 传输方式允许单根光纤携带全双工通路，通常可以比单向传输节约一半的光纤器件，由于两个方向传输的信号不交互产生 FWM（四波混频）产物，因此其总的 FWM 产物比双纤单向传输少很多，但缺点是该系统需要采用特殊的措施来对付光反射（包括由于光接头引起的离散反射和光纤本身的瑞利后向反射），以防多径干扰；当需要将光信号放大以延长传输距离时，必须采用双向光纤放大器以及光环行器等元件，但其噪声系数稍差。

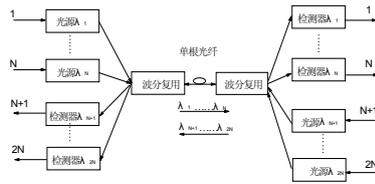


图 1-3 WDM 的双向传输方式

ITU-T 建议 G.692 文件对于单纤双向 WDM 和双纤单向 WDM 传输方式的优劣并未给出明确的看法。实用的 WDM 系统大都采用双纤单向传输方式。

1.4 开放式与集成式系统

DWDM 通常有两种应用形式：

- 开放式 DWDM
- 集成式 DWDM

开放式 DWDM 系统的特点是对复用终端光接口没有特别的要求，只要求这些接口符合 ITU-T 建议的光接口标准。DWDM 系统采用波长转换技术，将复用终端的光信号转换成指定的波长，不同终端设备的光信号转换成不同的符合 ITU-T 建议的波长，然后进行合波。

集成式 DWDM 系统没有采用波长转换技术，它要求复用终端的光信号的波长符合 DWDM 系统的规范，不同的复用终端设备发送不同的符合 ITU-T 建议的波长，这样他们在接入合波器时就能占据不同的通道，从而完成合波。

根据工程的需要可以选用不同的应用形式。在实际应用中，开放式 DWDM 和集成式 DWDM 可以混合使用。

1.5 WDM 系统组成

N 路波长复用的 WDM 系统的总体结构主要由发送和接收光复用终端（OMT）单元与中继线路发达（ILA）单元三部分组成，如果按组成模块来分有：

- 光波长转换单元（OTU）；
- 波分复用器：分波/合波器（ODU/OMU）；
- 光放大器（BA/LA/PA）；
- 光监控信道/通路（OSC）；

光波长转换单元（OTU）将非标准的波长转换为 ITU-T 所规范的标准波长，系统中应用光/电/光（O/E/O）的变换，即先用光电二极管 PIN 或 APD 把接收到的光信号转换为电信号，然后该电信号对标准波长的激光器进行调制，从而得到新的合乎要求的光波长信号。

波分复用器可分为发端的光合波器。光合波器用于传输系统的发送端，是一种具有多个输入端口和一个输出端口的器件，它的每一个输入端口输入一个预选波长的光信号，输入的不同波长的光波由同一输出端口输出。光分波器用于传输系统的接收端，正好与光合波器相反，它具有一个输入端口和多个输出端口，将多个不同波长信号分类开来。

光放大器不但可以对光信号进行直接放大，同时还具有实时、高增益、宽带、在线、低噪声、低损耗的全光放大器，是新一代光纤通信系统中必不可少 的关键器件。在目前实用的光纤放大器中主要有掺铒光纤放大器（EDFA）、半导体光放大器（SOA）和光纤拉曼放大器（FRA）等，其中掺铒光纤放大器以其优越的性能被广泛应用于长距离、大容量、高速率的光纤通信系统中，作为前置放大器、线路放大器、功率放大器使用。

光监控信道是为 WDM 的光传输系统的监控而设立的。ITU-T 建议优选采用 1510nm 波长，容量为 2Mbit/s。靠低速率下高的接收灵敏度（优于 -50dBm）仍能正常工作。但必须在 EDFA 之前下光路，而在 EDFA 之后上光路。

1.6 WDM 的优势

光纤的容量是极其巨大的，而传统的光纤通信系统都是在一根光纤中传输一路光信号，这样的方法实际上只使用了光纤丰富带宽的很少一部分。为了充分利用光纤的巨大带宽资源，增加光纤的传输容量，以密集 WDM（DWDM）技术为核心的新一代的光纤通信技术已经产生。

WDM 技术具有如下特点：

■ 超大容量

目前使用的普通光纤可传输的带宽是很宽的，但其利用率还很低。使用 DWDM 技术可以使一根光纤的传输容量比单波长传输容量增加几倍、几十倍乃至几百倍。现在商用最高容量光纤传输系统为 1.6Tbit/s 系统，朗讯和北电网络两公司提供的该类产品都采用 160x10Gbit/s 方案结构。容量 3.2Tbit/s 实用化系统的开发已具备条件。

■ 对数据的“透明”传输

由于 DWDM 系统按光波长的不同进行复用和解复用，而与信号的速率和电调制方式无关，即对数据是“透明”的。一个 WDM 系统的业务可以承载多种格式的“业务”信号，如 ATM、IP 或者将来有可能出现的信号。WDM 系统完成的是透明传输，对于“业务”层信号来说，WDM 系统中的各个光波长通道就像“虚拟”的光纤一样。

■ 系统升级时能最大限度地保护已有投资

在网络扩充和发展中，无需对光缆线路进行改造，只需更换光发射机和光接收机即可实现，是理想的扩容手段，也是引入宽带业务（例如 CATV、HDTV 和 B-ISDN 等）的方便手段，而且利用增加一个波长即可引入任意想要的新业务或新容量。

■ 高度的组网灵活性、经济性和可靠性

利用 WDM 技术构成的新型通信网络比用传统的时分复用技术组成的网络结构要大大简化，而且网络层次分明，各种业务的调度只需调整相应光信号的波长即可实现。由于网络结构简化、层次分明以及业务调度方便，由此而带来的网络的灵活性、经济性和可靠性是显而易见的。

■ 可兼容全光交换

可以预见，在未来可望实现的全光网络中，各种电信业务的上/下、交叉连接等都是在光上通过对光信号波长的改变和调整来实现的。因此，WDM 技术将是实现全光网的关键技术之一，而且 WDM 系统能与未来的全光网兼容，将来可能会在已经建成的 WDM 系统的基础上实现透明的、具有高度生存性的全光网络。

1.7 CWDM 简介

DWDM（密集波分复用）无疑是当今光纤应用领域的首选技术，但其也存在价格比较昂贵的一面。有没有可能以较低的成本享用波分复用技术呢？面对这一需求，CWDM（稀疏波分复用）应运而生。

稀疏波分复用，顾名思义，是密集波分复用的近亲，它们的区别有两点：

（1）CWDM 载波通道间距较宽，因此一根光纤上只能复用 2 到 16 个左右波长的光波，“稀疏”与“密集”称谓的差别就由此而来；（2）CWDM 调制激光采用非冷却激光，而 DWDM 采用的是冷却激光，它需要冷却技术来稳定波长，实现起来难度很大，成本也很高。CWDM 避开了这一难点，CWDM 系统采用的 DFB 激光器不需要冷却，因而大幅降低了成本，整个 CWDM 系统成本只有 DWDM 的 30%。随着越来越多的城域网运营商开始寻求更合理的传输解决方案，CWDM 越来越广泛地被业界接受。

在同一根光纤中传输的不同波长之间的间距是区分 DWDM 和 CWDM 的主要参数。目前的稀疏波分复用系统一般工作在从 1260nm 到 1620nm 波段，间隔为 20nm，可复用 16 个波长通道，其中 1400nm 波段由于损耗较大，一般不用。

相对于密集波分复用系统，稀疏波分复用系统在提供一定数量的波长和 100 公里以内的传输距离的同时，大大降低了系统的成本，并具有非常强的灵活性。因此稀疏波分复用系统主要应用于城域网中。CWDM 用很低的成本提供了很高的接入带宽，适用于点对点、以太网、SONET 环等各种流行的网络结构，特别适合短距离、高带宽、接入点密集的通信场合，如大楼内或大楼之间的网络通信。

但是，CWDM 是成本与性能折衷的产物，不可避免地存在一些性能上的局限。业内专家指出，CWDM 目前主要存在以下三点不足：（1）CWDM 在单根光纤上支持的复用波长个数较少，导致日后扩容成本较高；（2）复用器、复用调制器等设备的成本还应进一步降低，这些设备不能只是 DWDM 相应设备的简单改型；（3）CWDM 还未形成标准。

综上所述，波分复用系统从 20 世纪 90 年代中期开始，受市场需要和技术发展的驱动，在国内外都呈现出了飞速发展的态势，主要应用于长途传输网的密集波分复用系统和应用于城域网以及以太网的稀疏波分复用系统都有了很大的突破并得到了大量的商用，同时，系统的发展主要取决于关键技术的突破和相关标准的制定，过去数年的发展都证明了这一点。

1.8 思考题

什么是 WDM、DWDM 以及 CWDM？

简述 WDM 设备的两种传输方式？

什么是开放式与集成式系统？

简述 WDM 系统的组成？

2 WDM 传输媒质

(2) 目标：

掌握光纤的基本结构和种类。

了解光纤的基本特性。

2.1 光纤的结构

通信中使用的光纤，其核心部分是由圆柱形玻璃纤芯和玻璃包层构成，最外层是一种弹性耐磨的塑料护套，整根光纤呈圆柱形。光纤的典型结构如图 1-4 所示。

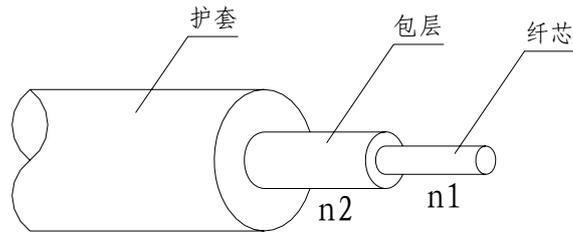


图 1-4 光纤的典型结构

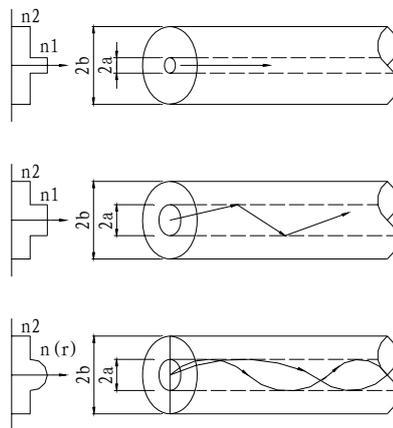


图 1-5 三种典型光纤

纤芯的粗细、材料和包层材料的折射率，对光纤的特性起着决定性的影响。图 1-5 所示为三种典型光纤的情况。从图中可看出，纤芯和包层横截面上，折射率剖面有两种典型的分布。一种是纤芯和包层折射率沿光纤径向分布都是均匀的，而在纤芯和包层的交界面上，折射率呈阶梯形突变，这种光纤称为阶跃折射率光纤。另一种是，纤芯的折射率不是均匀常数，而是随纤芯径向坐标增加而逐渐减少，一直渐变到等于包层折射率值，因而将这种光纤称为渐变折射率光纤。这两种光纤剖面的共同特点是：纤芯的折射率 n_1 大于包层折射率 n_2 ，这也是光信号在光纤中传输的必要条件。对阶跃折射率光纤而言，它可以使光波在纤芯和包层的交界面形成全反射，引导光波沿纤芯向前传播；对于渐变折射率光纤而言，它可以使光波在纤芯中产生连续折射，形成穿过光纤轴线的类似于正弦波的光射线，引导光波沿纤芯向前传播，两种光射线轨迹如图 1-5 所示。阶跃折射率光纤和渐变折射率光纤，随着纤芯直径的粗细不同，光纤中传输模式的数量多少也不同。因此，阶跃折射率光纤或渐变折射率光纤又都可以按照传输模式的数量多少，分为单模光纤和多模光纤，这又是一种光纤的分类方法。单模光纤的纤芯直径极细，直径一般小于 $10\mu\text{m}$ ；多模光纤的纤芯直径较粗，通常直径等于 $50\mu\text{m}$ 左右。但从光纤的外观上来看，两种光纤区别不大，包括塑料护套的光纤直径都小于 1mm 。

2.2 光纤的种类

由于单模光纤具有内部损耗低、带宽大、易于升级扩容和成本低的优点，国际上已一致认同 DWDM 系统将只使用单模光纤作为传输媒质。目前，ITU-T 已经在 G.652、G.653、G.654 和 G.655 建议中分别定义了 4 种不同设计的单模光纤。

其中 G.652 光纤是目前已广泛使用的单模光纤，称为 1310nm 性能最佳的单模光纤，又称为色散未移位的光纤。按纤芯折射率剖面，又可分为匹配包层光纤和下陷包层光纤两类，两者的性能十分相近，前者制造简单，但在 1550nm 波长区的宏弯损耗和微弯损耗稍大；而后者连接损耗稍大。

G.653 光纤称为色散移位光纤或 1550nm 性能最佳光纤。这种光纤通过设计光纤折射率的剖面，使零色散点移到 1550nm 窗口，从而与光纤的最小衰减窗口获得匹配，使超高速超长距离光纤传输成为可能。

G.654 光纤是截止波长移位的单模光纤。这类光纤的设计重点是降低 1550nm 的衰减，其零色散点仍然在 1310nm 附近，因而 1550nm 的色散较高，可达 $18\text{ps}/(\text{nm}\cdot\text{km})$ ，必须配用单纵模激光器才能消除色散的影响。

G.654 光纤主要应用于需要很长再生段距离的海底光纤通信。

G.655 光纤是非零色散移位单模光纤，与 G.653 光纤相近，从而使 1550nm 附近保持了一定的色散值，避免在 DWDM 传输时发生四波混频现象，适合于 DWDM 系统应用。

除上述所讲的四种已正式标准化的光纤外，还有一种适合于更大容量和更长传输距离的大有效面积光纤也已经问世。其零色散点在 1510nm 左右，但有效面积增大到 72 平方 μm 以上，因而可以更有效地克服非线性影响，最适合以 10Gbit/s 为基础的 DWDM 系统应用。

◇ 想一想：

在我国，大面积敷设的是哪一种光纤？

2.3 光纤的基本特性

2.3.1 几何尺寸（模场直径）

单模光纤的纤径直径为 8~9 μm ，与工作波长 1.3~1.6 μm 处于同一数量级，由于光衍射效应，不易测出纤芯直径的精确值。此外，由于基模 LP₀₁ 场强的分布不只局限于纤芯之内，因而单模光纤纤芯直径的概念在物理上已没有什么意义，应改用模场直径的概念。模场直径是光纤内基模场强空间强度分布集中程度的度量。

G.652 光纤在 1310nm 波长区的模场直径标称值应在 8.6~9.5 μm 范围，偏差小于 10%；G.655 光纤在 1550nm 波长区的模场直径标称值应在 8~11 μm 范围，偏差小于 10%。

上述两种单模光纤的包层径均为 125 μm 。

2.3.2 衰减常数

光纤的损耗主要取决于吸收损耗、散射损耗、弯曲损耗三种损耗，弯曲损耗前面已经讲过，对光纤衰减常数的影响不大；决定光纤衰减常数的损耗主要是吸收损耗和散射损耗。

吸收损耗是制造光纤的材料本身造成的，其中的过量金属杂质和氢氧根 OH⁻ 离子对光的吸收而产生的损耗。

散射损耗通常是由于光纤材料密度的微观变化，以及所含 SiO₂、GeO₂ 和 P₂O₅ 等成分的浓度不均匀，使得光纤中出现一些折射率分布不均匀的局部

区域，从而引起光的散射，将一部分光功率散射到光纤外部引起损耗；或者在制造光纤的过程中，在纤芯和包层交界面上出现某些缺陷、残留一些气泡和气痕等。这些结构上有缺陷的几何尺寸远大于光波，引起与波长无关的散射损耗，并且将整个光纤损耗谱曲线上移，但这种散射损耗相对前一种散射损耗而言要小得多。

综合以上几个方面的损耗，单模光纤在 1310nm 和 1550nm 波长区的衰减常数一般分别为 0.3~0.4dB/km(1310nm)和 0.17~0.25dB/km(1550nm)。ITU-T G.652 建议规定光纤在 1310nm 和 1550nm 的衰减常数应分别小于 0.5dB/km 和 0.4dB/km。

2.3.3 色散系数

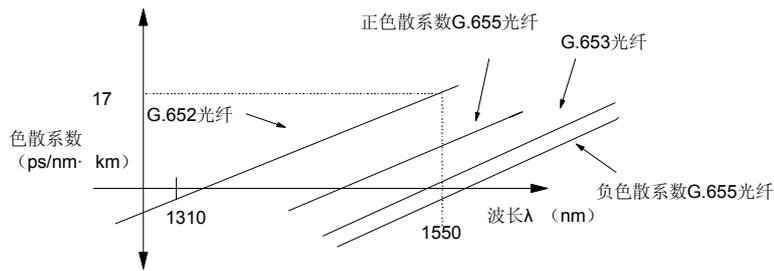
光纤的色散指光纤中携带信号能量的各种模式成分或信号自身的不同频率成分因群速度不同，在传播过程中互相散开，从而引起信号失真的物理现象。一般光纤存在三种色散：

- 1) 模式色散：光纤中携带同一个频率信号能量的各种模式成分，在传输过程中由于不同模式的时间延迟不同而产生。
- 2) 材料色散：由于光纤纤芯材料的折射率随频率变化，使得光纤中不同频率的信号分量具有不同的传播速度而引起的色散。
- 3) 波导色散：光纤中具有同一个模式但携带不同频率的信号，因为不同的传播群速度而引起的色散。

这三种色散统称为色度色散。ITU-T G.652 建议规定零色散波长范围为：1300nm~1324nm，最大色散斜率为 0.093ps/(nm².km)，在 1525~1575nm 波长范围内的色散系数约为 20ps/(nm.km)。ITU-T G.653 建议规定零色散波长为：1550nm，在 1525~1575nm 区的色散斜率为 0.085ps/(nm.km)。在 1525~1575nm 波长范围内的最大色散系数为 3.5ps/(nm.km)。G.655 光纤在 1530~1565nm 范围内的色散系数在绝对值应处于 0.1~6.0 ps/(nm.km)。

📖 技术细节：

几种光纤色散特性如下图：



2.4 思考题

光纤的种类有那些，各有什么特点？

色散的种类有那些？

3 DWDM 关键技术

目标：

- 了解 DWDM 光源的要求及解决方法。
- 了解 DWDM 光放大技术。
- 了解 DWDM 复用和解复用技术。
- 了解 DWDM 的光监控信道。

3.1 光源

光源的作用是产生激光或荧光，它是组成光纤通信系统的重要器件。目前应用于光纤通信的光源半导体激光器 LD (Laser Diode) 和半导体发光二极管 LED (Light Emitting Diode)，都属于半导体器件。共同特点是：体积小、重量轻、耗电量小。

LD 和 LED 相比，其主要区别在于，前者发出的是激光，后者发出的是荧光，因此，LED 的谱线宽度较宽，调制效率低，与光纤的耦合效率也低；但它的输出特性曲线线性好，使用寿命长，成本低，适用于短距离、小容量的传输系统。而 LD 一般适用于长距离、大容量的传输系统，在高速率的 PDH 和 SDH 设备上被广泛采用。

高速光纤通信系统中使用的光源分为多纵模 (MLM) 激光器和单纵模 (SLM) 激光器两类。从性能上讲，这两类半导体激光器的主要区别在于它们发射频谱的差异。MLM 激光器的发射频谱的线宽较宽，为 nm 量级，而且可以观察到多个谐振峰的存在。SLM 激光器发射频谱的线宽，为 0.1nm 量

级，而且只能观察到单个谐振峰。SLM 激光器比 MLM 激光器的单色性更好。

DWDM 系统的工作波长较为密集，一般波长间隔为几个纳米到零点几个纳米，这就要求激光器工作在一个标准波长上，并且具有很好的稳定性；另一方面，DWDM 系统的无电再生中继长度从单个 SDH 系统传输 50~60km 增加到 500~600km，在延长传输系统的色散受限距离的同时，为了克服光纤的非线性效应（如受激布里渊散射效应（SBS）、受激拉曼散射效应（SRS）、自相位调制效应（SPM）、交叉相位调制效应（XPM）、调制的不稳定性以及四波混频（FWM）效应等），要求 DWDM 系统的光源使用技术更为先进、性能更为优越的激光器。

总之，DWDM 系统的光源的两个突出的特点是：

1. 比较大的色散容纳值；
2. 标准而稳定的波长。

3.1.1 激光器的调制方式

目前广泛使用的光纤通信系统均为强度调制——直接检波系统，对光源进行强度调制的方法有两类，即直接调制和间接调制。

■ 直接调制

直接调制：又称为内调制，即直接对光源进行调制，通过控制半导体激光器的注入电流的大小来改变激光器输出光波的强弱。传统的 PDH 和 2.5Gbit/s 速率以下的 SDH 系统使用的 LED 或 LD 光源基本上采用的都是这种调制方式。

直接调制方式的特点是输出功率正比于调制电流，具有结构简单、损耗小、成本低的特点，但由于调制电流的变化将引起激光器发光谐振腔的长度发生变化，引起发射激光的波长随着调制电流线性变化，这种变化被称作调制啁啾，它实际上是一种直接调制光源无法克服的波长（频率）抖动。啁啾的存在展宽了激光器发射光谱的带宽，使光源的光谱特性变坏，限制了系统的传输速率和距离。一般情况下，在常规 G.652 光纤上使用时，传输距离 ≤ 100 公里，传输速率 $\leq 2.5\text{Gbit/s}$ 。

对于不采用光线路放大器的 DWDM 系统，从节省成本的角度出发，可以考虑使用直接调制激光器。

■ 间接调制

间接调制：这种调制方式又称做外调制。即不直接调制光源，而是在光源的输出通道上外加调制器对光波进行调制，此调制器实际上起到一个开关的作用。结构如图 1-6 所示。

恒定光源是一个连续发送固定波长和功率的高稳定光源，在发光的过程中，不受电调制信号的影响，因此不产生调制频率啁啾，光谱的谱线宽度维持在最小。光调制器对恒定光源发出的高稳定激光根据电调制信号以“允许”或者“禁止”通过的方式进行处理，而在调制的过程中，对光波的频谱特性不会产生任何影响，保证了光谱的质量。

间接调制方式的激光器比较复杂、损耗大、而且造价也高，但调制频率啁啾很小，可以应用于传输速率 $\geq 2.5\text{Gbit/s}$ ，传输距离超过 300 公里以上的系统。因此，一般来说，在使用光线路放大器的 DWDM 系统中，发射部分的激光器均为间接调制方式的激光器。

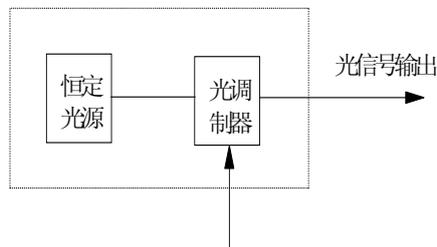


图 1-6 外调制激光器的结构

常用的外调制器有光电调制器、声光调制器和波导调制器等。

光电调制器基本工作原理是晶体的线性电光效应。电光效应是指电场引起晶体折射率变化的现象，能够产生电光效应的晶体称为电光晶体。

声光调制器是利用介质的声光效应制成。所谓声光效应，是声波在介质中传播时，介质受声波压强的作用而产生变化，这种变化使得介质的折射率发生变化，从而影响光波传输特性。

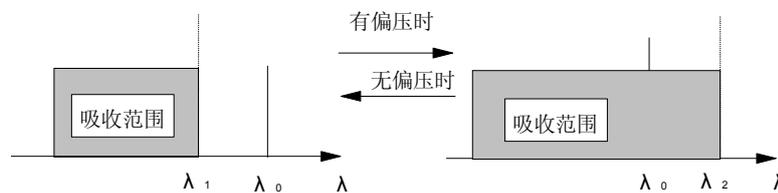
波导调制器是将钛（Ti）扩散到铌酸锂（LiNbO₂）基底材料上，用光刻法制出波导的具体尺寸。它具有体积小、重量轻、有利于光集成等优点。

根据光源与外调制器的集成和分离情况，又可以分为集成式外调制激光器和分离式外调制激光器两种方式。

集成外调制技术日益成熟，是 DWDM 光源的发展方向。常见的是更加紧凑小巧，与光源集成在一起，性能上也满足绝大多数应用要求的电吸收调制器。

电吸收调制器是一种损耗调制器，它工作在调制器材料吸收区边界波长处，当调制器无偏压时，光源发送波长在调制器材料的吸收范围之外，该波长的输出功率最大，调制器为导通状态；当调制器有偏压时，调制器材料的吸收区边界波长移动，光源发送波长在调制器材料的吸收范围内，输出功率最小，调制器为断开状态。如图 1-6 所示。

电吸收调制器可以利用与半导体激光器相同的工艺过程制造，因此光源和调制器容易集成在一起，适合批量生产，因此发展速度很快。例如，铟镓砷磷（InGaAsP）光电集成电路，是将激光器和电吸收调制器集成在一块芯片上，该芯片再置于一热电制冷器（TEC）上。这种典型的光电集成电路，称为电吸收调制激光器（EML），可以支持 2.5Gbit/s 信号传输 600km 以上的距离，远远超过直接调制激光器所能传输的距离，其可靠性也与标准 OFB 激光器类似，平均寿命达 20 年。



λ_1 为调制器无偏压时的吸收边波长
 λ_2 为调制器有偏压时的吸收边波长
 λ_0 为恒定光源的发光工作波长

图 1-7 电吸收调制器的吸收波长的改变示意图

分离式外调制激光器常用的是恒定光输出激光器（CW+LiNbO3）马赫-策恩德（Mach-Zehnder）外调制器。如图 1-8 所示。

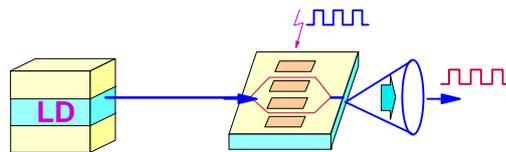


图 1-8 M-Z 外调制器示意图

该调制器是将输入光分成两路相等的信号，分别进入调制器的两个光支路，这两个光支路采用的材料是电光材料，即其折射率会随着外部施加的电信号大小而变化，由于光支路的折射率变化将导致信号相位的变化，故两个支路的信号在调制器的输出端再次结合时，合成的光信号是一个强度大小变化的

干涉信号，通过这种办法，将电信号的信息转换到了光信号上，实现了光强度调制。分离式外调制激光器的频率啁啾可以等于零，而且相对于电吸收集成式外调制激光器，成本较低。

3.1.2 激光器的波长的稳定

在 DWDM 系统中，激光器波长的稳定是一个十分关键的问题，根据 ITU-T G.692 建议的要求，中心波长的偏差不大于光信道间隔的正负五分之一，即当光信道间隔为 0.8nm 的系统，中心波长的偏差不能大于 $\pm 20\text{GHz}$ 。

在 DWDM 系统中，由于各个光通路的间隔很小（可低至 0.8nm），因而对光源的波长稳定性有严格的要求，例如 0.5nm 的波长变化就足以使一个光通路移到另一个光通路上。在实际系统中通常必须控制在 0.2nm 以内，其具体要求随波长间隔而定，波长间隔越小要求越高，所以激光器需要采用严格的波长稳定技术。

集成式电吸收调制激光器的波长微调主要是靠改变温度来实现的，其波长的温度灵敏度为 $0.08\text{nm}/^\circ\text{C}$ ，正常工作温度为 25°C ，在 15°C - 35°C 温度范围内调节芯片的温度，即可使 EML 调定在一个指定的波长上，调节范围为 1.6nm。芯片温度的调节靠改变制冷器的驱动电流，再用热敏电阻作反馈便可使芯片温度稳定在一个基本恒定的温度上。

分布反馈式激光器（DFB）的波长稳定是利用波长和管芯温度对应的特性，通过控制激光器管芯处的温度来控制波长，以达到稳定波长的目的。对于 $1.5\mu\text{m}$ DFB 激光器，波长温度系数约为 $0.02\text{nm}/^\circ\text{C}$ ，它在 15°C - 35°C 范围内中心波长符合要求。这种温度反馈控制的方法完全取决于 DFB 激光器的管芯温度。目前，MWQ-DFB 激光器工艺可以在激光器的寿命时间（20 年）内保证波长的偏移满足 DWDM 系统的要求。

除了温度外，激光器的驱动电流也能影响波长，其灵敏度为 $0.008\text{nm}/\text{mA}$ ，比温度的影响约小一个数量级，在有些情况下，其影响可以忽略。此外，封装的温度也可能影响到器件的波长（例如从封装到激光器平台的连线带来的温度传导和从封装壳向内部的辐射，也会影响器件的波长）。在一个设计良好的封装中其影响可以控制在最小。

以上这些方法可以有效解决短期波长的稳定问题，对于激光器老化等原因引起的波长长期变化就显得无能为力了。直接使用波长敏感元件对光源进行波长反馈控制是比较理想的，原理如图 3-4 所示，属于该类控制方案的标准波长控制和参考频率扰动波长控制，均正在研制中，很有前途。

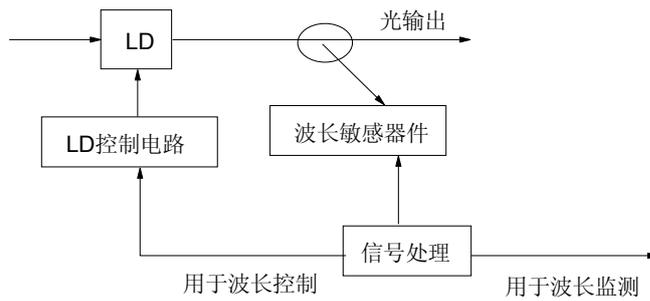


图 1-9 波长控制原理

◇ 想一想：

DWDM 系统中为何对波长的稳定性要求非常严格？

3.2 光电检测器

光电检测器的作用是把接收到的光信号转换成相应的电信号。由于从光纤传送过来的光信号一般是非常微弱的，因此对光检测器提出了非常高的要求：

- 1) 在工作波长范围内有足够高的响应度。
- 2) 在完成光电变换的过程中，引入的附加噪声应尽可能小。
- 3) 响应速度快。线性好及频带宽，使信号失真尽量小。
- 4) 工作稳定可靠。有较好的稳定性及较长的工作寿命。
- 5) 体积小，使用简便。

满足上述要求的半导体光检测器主要有两类：PIN 光电二极管和雪崩光电二极管（APD）。

3.2.1 PIN 光电二极管

PIN 光电二极管是一种半导体器件，其构成是在 P 型和 n 型之间夹着本征（轻掺杂）区域。在这个器件反向偏置时，表现出几乎是无穷大的内部阻抗（即像开路一样），输出电流正比于输入光功率。

PIN 光二极管的价格低，使用简单，但响应慢。

3.2.2 雪崩光电二极管（APD）

在长途光纤通信系统中，仅有毫瓦级的光功率从光发送机输出后，经光纤的长途传输，到达接收端的光信号十分微弱，一般仅有几个纳瓦。如果采用 PIN 光电二极管检测，那么输出的光电流仅有几个纳安，为了使光接收机的判决电路正常工作，必须对这个电流多级放大。由于在放大信号的过程中不可避免地会引入各种电路噪声，从而使光接收机的信噪比降低，灵敏度下降。为了克服 PIN 光电二极管的上述缺点，在光纤通信系统还采用一种具有内部电流放大作用的光电二极管，即雪崩二极管（APD）。雪崩二极管是利用光生载流子在耗尽区内的雪崩倍增效应，从而产生光电流的倍增作用。所谓雪崩倍增效应是指 PN 结外加高反向偏压后，在耗尽区内形成一个强电场。当耗尽区吸收光子时，激发出来的光生载流子被强电场加速，以极高的速度与耗尽区的晶格发生碰撞，产生新的光生载流子，并形成链锁反应，从而使光电流在光电二极管内部获得倍增。

雪崩二极管的增益和响应速度都优于 PIN 发光二极管，但其噪声特性差。

3.3 光放大器

我们知道光纤有一定的衰耗，光信号沿光纤传播将会衰减，传输距离受衰减的制约。因此，为了使信号传得更远，我们必须增强光信号。传统的增强光信号的方法是使用再生器。但是，这种方法存在许多缺点，首先，再生器只能工作在确定的信号比特率和信号格式下，不同的比特率和信号格式需要不同的再生器；其次，每一个信道需要一个再生器，网络的成本很高。于是，人们希望有一种不使用再生器也可以增强光信号的方法，即光放大技术。

3.3.1 光放大器概述

光放大器简单地增强光信号，如图 3-5。

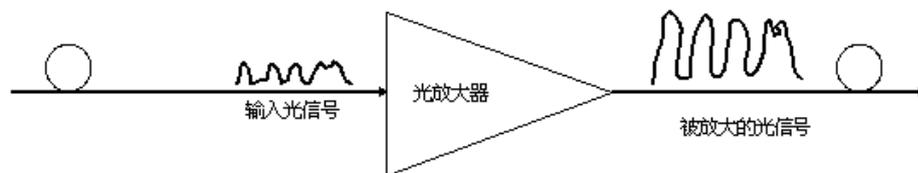


图 1-10 光放大器

光放大器的工作不需要转换光信号到电信号，然后再转回光信号。这个特性导致光放大器比再生器有两大优势。第一，光放大器支持任何比特率和信号格式，因为光放大器简单地放大所收到的信号。这种属性通常被描述为光放大器对任何比特率以及信号格式是透明的；第二，光放大器不仅支持单个信号波长放大—像再生器，而且支持一定波长范围的光信号放大。而且，只有光放大器能够支持多种比特率、各种调制格式和不同波长的时分复用和波分复用网络。实际上，只有光放大器特别是 EDFA 的出现，WDM 技术才真正在光纤通信中扮演重要角色。EDFA 是现在最流行的光放大器，它的出现把波分复用和全光网络的理论变成现实。

现在有两种主要类型的光放大器在使用：半导体光放大器（SOA）和光纤光放大器（FOA）。半导体光放大器实质上是半导体激光器的活性介质。换句话说，一个半导体放大器是一个没有或有很少光反馈的激光二极管。

光纤放大器与半导体放大器不同，光纤放大器的活性介质（或称增益介质）是一段特殊的光纤或传输光纤，并且和泵浦激光器相连；当信号光通过这一段光纤时，信号光被放大。光纤放大器又可以分为掺稀土离子光纤放大器（Rare Earth Ion Doped Fiber Amplifier）和非线性光纤放大器。像半导体放大器一样，掺稀土离子光纤放大器的工作原理也是受激辐射；而非线性光纤放大器是利用光纤的非线性效应放大光信号。实用化的光纤放大器有掺铒光纤放大器（EDFA）和光纤拉曼放大器（Raman Fiber Amplifier）。

EDFA（Erbium Doped Fiber Amplifier）掺铒光纤放大器作为新一代光通信系统的关键部件，具有增益高、输出功率大、工作光学带宽较宽、与偏振无关、噪声指数较低、放大特性与系统比特率和数据格式无关等优点。它是大容量 DWDM 系统中必不可少的关键部件。

根据 EDFA 在 DWDM 光传输网络中的位置，可以分功率放大器（Booster Amplifier），简称 BA；线路放大器（Line Amplifier），简称 LA；前置放大器（preamplifier），简称 PA。

光纤拉曼放大器的增益波长由泵浦光波长决定，只要泵浦源的波长适当，理论上可得到任意波长的信号放大，其增益介质为传输光纤本身、噪声指数低。当与常规 EDFA 混合使用时可大大降低系统的噪声指数，增加传输跨距。

3.3.2 掺铒光纤（EDF）

掺铒光纤是光纤放大器的核心，它是一种内部掺有一定浓度 Er^{3+} 的光纤，为了阐明其放大原理，需要从铒离子的能级图讲起。铒离子的外层电子具有三

能级结构（图 2-6 中 E1、E2 和 E3），其中 E1 是基态能级，E2 是亚稳态能级，E3 是高能级，如图 3-6 所示。

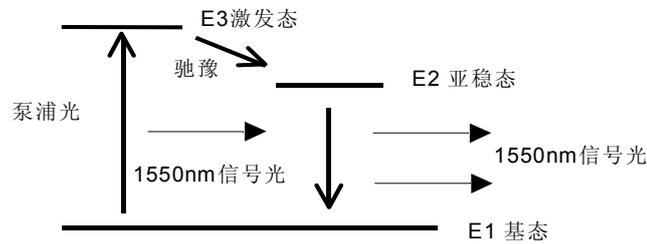


图 1-11 EDFA 能级图

当用高能量的泵浦激光器来激励掺铒光纤时，可以使铒离子的束缚电子从基态能级大量激发到高能级 E3 上。然而，高能级是不稳定的，因而铒离子很快会经历无辐射衰减（即不释放光子）落入亚稳态能级 E2。而 E2 能级是一个亚稳态的能带，在该能级上，粒子的存活寿命较长，受到泵浦光激励的粒子，以非辐射跃迁的形式不断地向该能级汇集，从而实现粒子数反转分布。当具有 1550nm 波长的光信号通过这段掺铒光纤时，亚稳态的粒子以受激辐射的形式跃迁到基态，并产生出和入射信号光中的光子一模一样的光子，从而大大增加了信号光中的光子数量，即实现了信号光在掺铒光纤传输过程中的不断被放大的功能。

3.3.3 EDFA 增益平坦控制

在 DWDM 系统中，复用的光通路数越来越多，需要串接的光放大器数目也越来越多，因而要求单个光放大器占据的谱宽也越来越宽。

然而，普通的以纯硅光纤为基础的掺铒光纤放大器（EDFA）的增益平坦区很窄，仅在 1549 至 1561nm 之间，大约 12nm 的范围，在 1530 至 1542nm 之间的增益起伏很大，可高达 8dB 左右。这样，当 DWDM 系统的通路安排超出增益平坦区时，在 1540nm 附近的通路会遭受严重的信噪比劣化，无法保证正常的信号输出。

为了解决上述问题，更好地适应 DWDM 系统的发展，人们开发出以掺铝的硅光纤为基础的增益平坦型 EDFA 放大器，大大地改善了 EDFA 的工作波长带宽，平抑了增益的波动。目前的成熟技术已经能够做到 1dB 增益平坦区并且几乎扩展到整个铒通带（1525nm~1560nm），基本解决了普通 EDFA 的

增益不平坦问题。未掺铝的 EDFA 和掺铝的 EDFA 的增益曲线对比如图 3-7 所示。

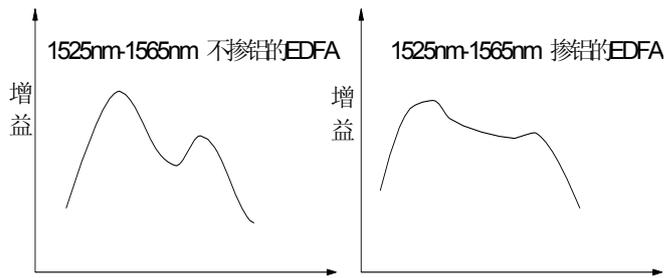


图 1-12 EDFA 增益曲线平坦性的改进

技术上，将 EDFA 光放大器增益曲线中 1525nm~1540nm 范围称做蓝带区，将 1540nm~1565nm 范围称做红带区，一般来说，当传输的容量小于 40Gbit/s 时，优先使用红带区。

说明：技术细节

EDFA 增益不平坦和平坦性能比较如图 3-8 所示。

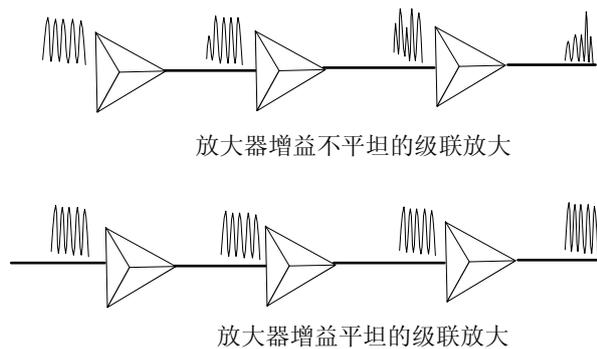


图 1-13 EDFA 增益平坦示意图

3.3.4 EDFA 的增益锁定

EDFA 的增益锁定是一个重要问题，因为 WDM 系统是一个多波长的工作系统，当某些波长信号失去时，由于增益竞争，其能量会转移到那些未丢失的信号上，使其它波长的功率变高。在接收端，由于电平的突然提高可能引起误码，而且在极限情况下，如果 8 路波长中 7 路丢失时，所有的功率都集中

到所剩的一路波长上，功率可能会达到 17dBm 左右，这将带来强烈的非线性或接收机接收功率过载，也会带来大量误码。

EDFA 的增益锁定有许多种技术，典型的有控制泵浦光源增益的方法。EDFA 内部的监测电路通过监测输入和输出功率的比值来控制泵浦源的输出，当输入波长某些信号丢失时，输入功率会减小，输出功率和输入功率的比值会增加，通过反馈电路，降低泵浦源的输出功率，保持 EDFA 增益（输出/输入）不变，从而使 EDFA 的总输出功率减少，保持输出信号电平的稳定。如图 3-9 所示。

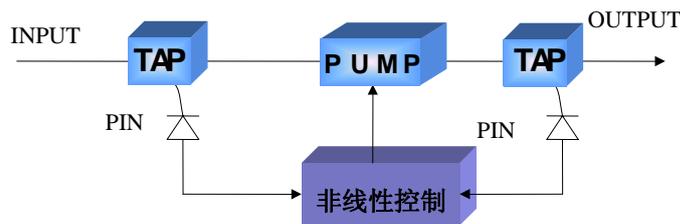


图 1-14 控制泵浦光源增益锁定技术

另外还有饱和波长的方法。在发送端，除了 8 路工作波长外，系统还发送另一个波长作为饱和波长，在正常情况下，该波长的输出功率很小，当线路的某些信号丢失时，饱和波长的输出功率会自动增加，用以补偿丢失的各波长信号的能量，从而保持 EDFA 输出功率和增益保持恒定，当线路的多波长信号恢复时，饱和波长的输出功率会相应减少，这种方法直接控制饱和波长激光器的输出，速度较控制泵浦源要快一些。

说明：技术细节

EDFA 增益不锁定和锁定性能比较：

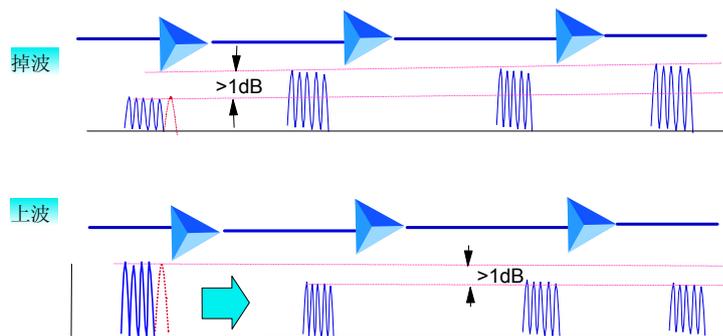


图 1-15 增益不锁定 EDFA 掉波、上波增益变化图

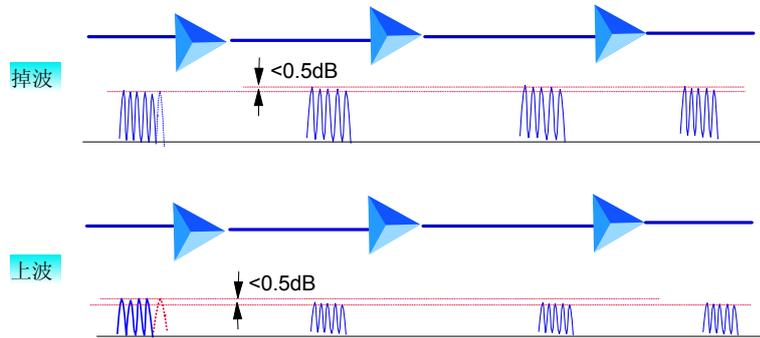


图 1-16 增益锁定 EDFA 掉波、上波增益变化图

3.3.5 掺铒光纤放大器的优缺点

1. 掺铒光纤放大器的主要优点：

(1) 工作波长与单模光纤的最小衰减窗口一致。

耦合效率高。由于是光纤放大器，易与传输光纤耦合连接。

能量转换效率高。掺铒光纤 EDF 的纤芯比传输光纤小，信号光和泵浦光同时在掺铒光纤 EDF 中传播，光能量非常集中。这使得光与增益介质 Er 离子的作用非常充分，加之适当长度的掺铒光纤，因而光能量的转换效率高。

增益高、噪声指数较低、输出功率大，串话很小。

增益特性稳定：EDFA 对温度不敏感，增益与偏振无关。

增益特性与系统比特率和数据格式无关。

掺铒光纤放大器（EDFA）是大容量 DWDM 系统中必不可少的关键部件。

2. 掺铒光纤放大器的主要缺点：

(1) 增益波长范围固定：Er 离子的能级之间的能级差决定了 EDFA 的工作波长范围是固定的，只能在 1550nm 窗口。这也是掺稀土离子光纤放大器的局限性，又例如，掺镨光纤放大器只能工作在 1310nm 窗口。

增益带宽不平坦：EDFA 的增益带宽很宽，但 EDFA 本身的增益谱不平坦。在 WDM 系统中应用时必须采取特殊的技术使其增益平坦。

光浪涌问题：采用 EDFA 可使输入光功率迅速增大，但由于 EDFA 的动态增益变化较慢，在输入信号能量跳变的瞬间，将产生光浪涌，即输出光功率出现尖峰，尤其是当 EDFA 级联时，光浪涌现象更为明显。峰值光功率可以达到几瓦，有可能造成 O/E 变换器和光连接器端面的损坏。

3.3.6 拉曼光纤放大器

在常规光纤系统中，光功率不大，光纤呈线性传输特性。当注入光纤一非线性光学介质中的光功率非常高时，高能量（波长较短）的泵浦光散射，将一小部分入射功率转移到另一频率下移的光束，频率下移量由介质的振动模式决定，此过程称为拉曼效应。量子力学描述为入射光波的一个光子被一个分子散射成为另一个低频光子，同时分子完成振动态之间的跃迁。入射光子称为泵浦光，低频的频移光子称为斯托克斯波（stokes 波）。普通的拉曼散射需要很强的激光功率。但是在光纤通讯中，作为非线性介质的单模光纤，其纤芯直径非常小（一般小于 $10\mu\text{m}$ ），因此单模光纤可将高强度的激光场与介质的相互作用限制在非常小的截面内，大大提高了入射光场的光功率密度，在低损耗光纤中，光场与介质的作用可以维持很长的距离，其间的能量耦合进行的很充分，使得在光纤中利用受激拉曼散射成为可能。

实验证明，石英光纤具有很宽的受激拉曼散射（SRS）增益谱，并在泵浦光频率下移约 13THz 附近有一较宽的增益峰。如果一个弱信号与一强泵浦光波同时在光纤中传输，并使弱信号波长置于泵浦光的拉曼增益带宽内，弱信号光即可得到放大，这种基于受激拉曼散射机制的光放大器即称为拉曼光纤放大器。拉曼放大器增益的是开关增益，即放大器打开与关闭状态下输出功率的差值

拉曼光纤放大器有三个突出的特点：

（1）其增益波长由泵浦光波长决定，只要泵浦源的波长适当，理论上可得到任意波长的信号放大，如图 3-12，其中虚线为三个泵浦源产生的增益谱。拉曼光纤放大器的这一特点使拉曼光纤放大器可以放大 EDFA 所不能放大的波段，使用多个泵源还可得到比 EDFA 宽得多的增益带宽（后者由于能级跃迁机制所限，增益带宽只有 80nm），因此，对于开发光纤的整个低损耗区 1270nm-1670nm 具有无可替代的作用。

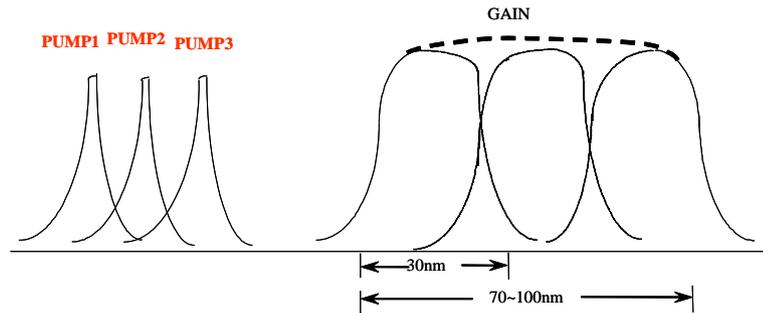


图 1-17 多泵浦时的 Raman 增益谱

(2) 其增益介质为传输光纤本身；这使拉曼光纤放大器可以对光信号进行在线放大，构成分布式放大，实现长距离的无中继传输和远程泵浦，尤其适用于海底光缆通信等不方便设立中继器的场合，而且因为放大是沿光纤分布而不是集中作用，光纤中各处的信号光功率都比较小，从而可降低非线性效应尤其是四波混频（FWM）效应的干扰。

(3) 噪声指数低，这使其与常规 EDFA 混合使用时可大大降低系统的噪声指数，增加传输跨距。

3.3.7 有关光放大器的技术指标

- 单路或合路光纤最大光功率电平为+17dBm 或+20dBm，应保持光接头和光连接器的清洁。
- 光放大器必须有明显的安全标志以确保人身安全。当光纤断开时，应具有泵浦源自动关闭功能或将 EDFA 输出功率降低到安全功率以内。
- 光放大器光器件（泵浦源）寿命应不小于 30 万 h。

3.4 光复用器和光解复用器

波分复用系统的核心部件是波分复用器件，即光复用器和光解复用器（有时也称合波器和分波器），实际上均为光学滤波器，其性能好坏在很大程度上决定了整个系统的性能。如图 3-13 所示。合波器的主要作用是将多个信号波长合在一根光纤中传输；分波器的主要作用是在一根光纤中传输的多个波长信号分离。WDM 系统性能好坏的关键是 WDM 器件，其要求是复用信道数量足够、插入损耗小、串音衰耗大和通带范围宽等。从原理上讲，合波

器与分波器是相同的，只需要改变输入、输出的方向。WDM 系统中使用的波分复用器件的性能满足 ITU-T G.671 及相关建议的要求。

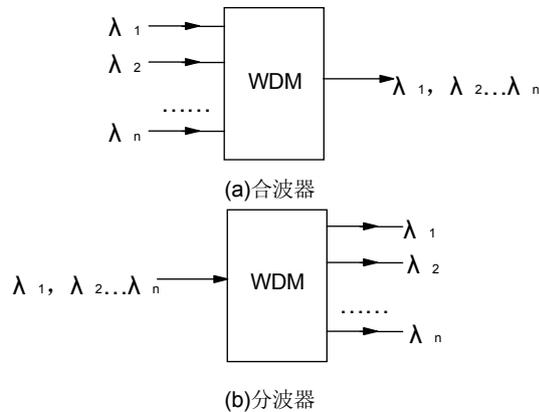


图 1-18 DWDM 器件

光波分复用器的种类有很多，大致可以分为四类：干涉滤光器型、光纤耦合器型、光栅型、阵列波导光栅（AWG）型。

3.4.1 光栅型波分复用器

光栅型波分复用器属于角色散型器件，是利用角色散元件来分离和合并不同波长的光信号。最流行的衍射光栅是在玻璃衬底上沉积环氧树脂，然后再在环氧树脂上制造光栅线，构成所谓反射型闪烁光栅。入射光照射到光栅上后，由于光栅的角色散作用，不同波长的光信号以不同的角度反射，然后经透镜会聚到图 3-14，不同的输出光纤，从而完成波长选择功能；逆过程也成立，如所示。闪烁光栅的优点是高分辨的波长选择作用，可以将特定波长的绝大部分能量与其他波长进行分离且方向集中。

闪烁光栅型滤波器具有优良的波长选择性，可以使波长的间隔缩小到 0.5nm 左右。另外，光栅型器件是并联工作的，插入损耗不会随复用通路波长数的增加而增加，因而可以获得较多的复用通路数，已能实现 131 个波长间距为 0.5nm 的复用，其隔离度也较好。当波长间隔为 1nm 时隔离度可以高达 55dB。闪烁光栅的缺点是插入损耗较大，通常有 3~8dB，对极化很敏感，光通路带宽/通路间隔比尚不很理想，使光谱利用率不够高，对光源和波分复用器的波长容错性要求较高。此外，其温度漂移随所用材料的热膨胀系数和折射率变化而变化，典型器件的温度漂移大约为 0.012nm/°C，比较大。若采

用温度控制措施，则温度漂移可以减少至 $0.0004\text{nm}/^\circ\text{C}$ 。因此，对于波分复用器采用温控措施是可行和必要的。

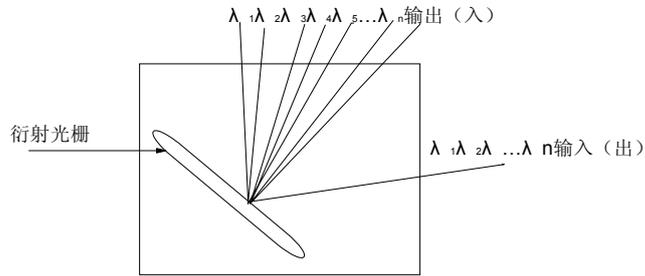


图 1-19 闪烁光栅波分复用器原理

这类光栅在制造上要求较精密，不适合于大批量生产，因此往往在实验室的科学研究中应用较多。

除上述传统的光纤器件外，布拉格光纤光栅滤波器的制造技术也逐渐成熟起来，它的制造方法是利用高功率紫外光波束干涉，从而在光纤纤芯区形成周期性的折射率变化，精度可达每厘米 10000 线，如图 3-15 所示。布拉格光纤光栅的设计和制造比较快捷方便，成本较低，插入损耗很小，温度特性稳定，其滤波特性带内平坦，而带外十分陡峭（滚降斜率优于 $150\text{dB}/\text{nm}$ ，带外抑制比高达 50dB ），整个器件可以直接与系统中光纤融为一体，因此可以制作成信道间隔非常小的带通或带阻滤波器，目前在波分复用系统中得到

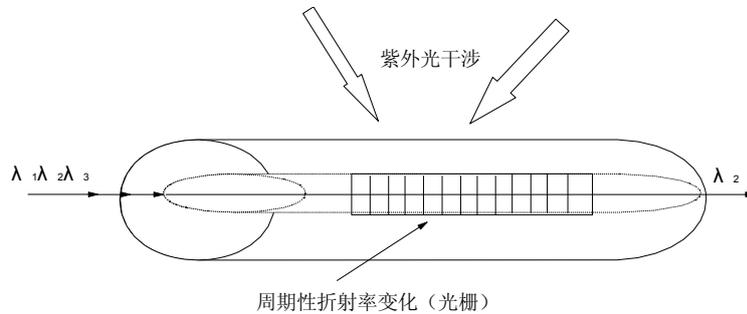


图 1-20 光导纤维中布拉格光栅滤波器

了广泛的应用。然而这类光纤光栅滤波器的波长适用范围较窄，只适用于单个波长，带来的好处是可以随着使用的波长数而增减滤波器，应用比较灵活。

3.4.2 介质薄膜型波分复用器

介质薄膜滤波器型波分复用器是由介质薄膜（DTF）构成的一类芯交互型波分复用器。DTF干涉滤波器是由几十层不同材料、不同折射率和不同厚度的介质膜，按照设计要求组合起来，每层的厚度为 $1/4$ 波长，一层为高折射率，一层为低折射率，交替叠合而成。当光入射到高折射层时，反射光没有相移；当光入射到低折射层时，反射光经历 180° 相移。由于层厚 $1/4$ 波长（ 90° ），因而经低折射率层反射的光经历 360° 相移后与经高折射率层的反射光同相叠加。这样在中心波长附近各层反射光叠加，在滤波器前端面形成很强的反射光。在这高反向射区之外，反射光突然降低，大部分光成为透射光。据此可以使薄膜干涉型滤波器对一定波长范围呈通带，而对另外波长范围呈阻带，形成所要求的滤波特性。薄膜干涉型滤波器的结构原理如图 3-16 所示。

介质薄膜滤波器波分复用器的主要特点是，设计上可以实现结构稳定的小型化器件，信号通带平坦且与极化无关，插入损耗低，通路间隔度好。缺点是通路数不会很多。具体特点还与结构有关，例如薄膜滤波器型波分复用器在采用软型材料的时候，由于滤波器容易吸潮，受环境的影响而改变波长；采用硬介质薄膜时材料的温度稳定性优于 $0.0005\text{nm}/^\circ\text{C}$ 。另外，这种器件的设计和制造过程较长，产量较低，光路中使用环氧树脂时隔离度不易很高，带宽不易很窄。

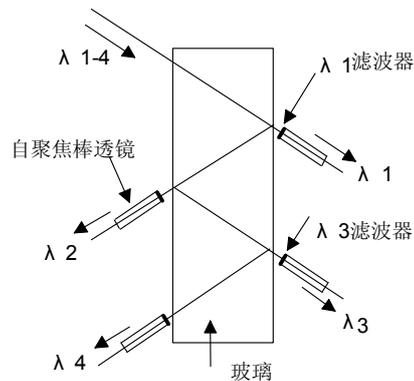


图 1-21 薄膜干涉滤光器型分波器原理

在波分复用系统中，当只有 4 至 16 个波长波分复用时，使用该型波分复用器件，是比较理想的。

3.4.3 熔锥型波分复用器

光纤耦合器有两类，应用较广泛的是熔拉双锥（熔锥）式光纤耦合器，即将多根光纤在热熔融条件下拉成锥形，并稍加扭曲，使其熔接在一起。由于不同的光纤的纤芯十分靠近，因而可以通过锥形区的消逝波耦合来达到需要的耦合功率。第二种是采用研磨和抛光的方法去掉光纤的部分包层，只留下很薄的一层包层，再将两根经同样方法加工的光纤对接在一起，中间涂有一层折射率匹配液，于是两根光纤可以通过包层里的消逝波发生耦合，得到所需要的耦合功率。熔锥式波分复用器件制造简单，应用广泛。

3.4.4 集成光波导型波分复用器

集成光波导型波分复用器是以光集成技术为基础的平面波导型器件，典型制造过程是在硅片上沉积一层薄薄的二氧化硅玻璃，并利用光刻技术形成所需要的图案并腐蚀成型。该器件可以集成生产，在今后的接入网中有很大的应用前景，而且，除了波分复用器之外，还可以作成矩阵结构，对光信道进行上/下分插（OADM），是今后光传送网络中实现光交换的优选方案。

使用集成光波导波分复用器较有代表性的是日本 NTT 公司制作的阵列波导光栅（Arrayed Waveguide Grating）光合波分波器，它具有波长间隔小、信道数多、通带平坦等优点，非常适合于超高速、大容量波分复用系统使用。其结构示意图如图 3-17 所示。

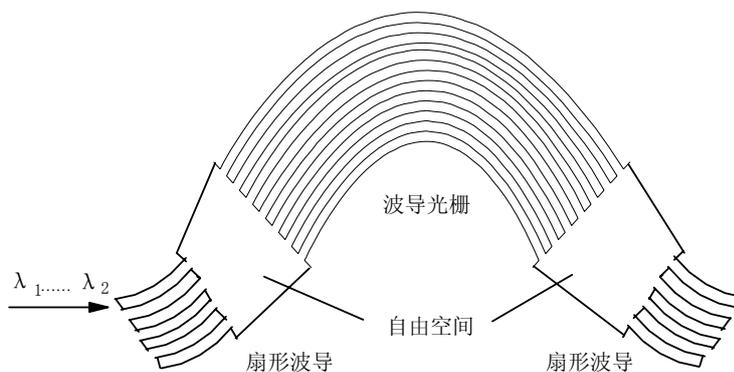


图 1-22 AWG 波分复用器原理

3.4.5 波分复用器件性能比较

表 1-1 各种波分复用器件性能的比较

| 器件类型 | 机理 | 批量生产 | 通道间隔 (nm) | 通道数 | 串音 (dB) | 插入损耗 (dB) | 主要缺点 |
|--------|-------|------|-----------|------|------------|-----------|-------|
| 衍射光栅型 | 角色散 | 一般 | 0.5~10 | 131 | ≤-30 | 3~6 | 温度敏感 |
| 介质薄膜型 | 干涉/吸收 | 一般 | 1~100 | 2~32 | ≤-25 | 2~6 | 通路数较少 |
| 熔锥型 | 波长依赖型 | 较容易 | 10~100 | 2~6 | ≤- (10~45) | 0.2~1.5 | 通路数少 |
| 集成光波导型 | 平面波导 | 容易 | 1~5 | 4~32 | ≤-25 | 6~11 | 插入损耗大 |

3.4.6 对光复用器件的基本要求

波分复用器件是波分复用系统的重要组成部分，为了确保波分复用系统的性能，对波分复用器件提出了基本要求，主要是插入损耗小、隔离度大、带内平坦、带外插入损耗变化陡峭，温度稳定性好，复用通路数多，尺寸小等。

1.合波器（OMU）

WDM 系统的合波器可以采用各种技术来实现，目前常用的 16 通路和 32 通路合波器有集成光波导型和介质薄膜滤波器型，它的相关参数应满足表 3-2 合波器参数要求。

表 1-2 合波器参数要求

| 项目 | 单位 | 16通路指标 | 32通路指标 |
|------------|----|-----------|-----------|
| 插入损耗 | dB | <10 | <12 |
| 光反射系数 | dB | >40 | >40 |
| 工作波长范围 | nm | 1548-1561 | 1530-1561 |
| 偏振相关损耗 | dB | <0.5 | <0.5 |
| 相邻通路隔离度 | dB | >22 | >22 |
| 非相邻通路隔离度 | dB | >25 | >25 |
| 各通路差损的最大差异 | dB | <2 | <3 |

2.分波器（ODU）

WDM 系统的分波器可以采用各种技术来实现，目前常用的 16 通路 WDM 系统分波器有光纤布喇格光栅型、介质薄膜滤波器型和集成光波导型，它的相关参数应满意表 3-3 的要求。

表 1-3 合波器参数要求

| 项目 | 单位 | 16通路指标 | 32通路指标 |
|------|-----|--------|--------|
| 通路间隔 | GHz | 100 | 100 |
| 插入损耗 | dB | <8 | <10 |



| | | | |
|------------|------|------|------|
| 光反射系数 | nm | 40 | 40 |
| 相邻通路隔离度 | dB | >25 | >25 |
| 非相邻通路隔离度 | dB | >25 | >25 |
| 偏振相关损耗 | dB | 0.5 | 0.5 |
| 各通路差损的最大差异 | dB | <2 | <3 |
| 温度特性 | nm/C | * | * |
| -1dB带宽 | nm | >0.2 | >0.2 |
| -20dB带宽 | nm | * | * |

3.5 光监控信道

在 SDH 系统中，网管可以通过 SDH 帧结构中的开销字节（如 E1、E2、D1~D12 等）来处理对网络中的设备进行管理和监控，无论是 TM、ADM 还是 REG。与 SDH 系统不同，在 DWDM 系统中，在线路放大设备只对业务信号进行光放大，业务信号只有光-光的过程，无业务信号的上下，所以必须增加一个信号对光放大器的运行状态进行监控；其次如果利用波长承载 SDH 的开销字节，那么利用哪一路 SDH 信号呢？况且如果 DWDM 中的信道所承载的业务不是 SDH 信号而是其它类型的业务时，怎么办？而且让管理和监控信息依赖于业务是不行的。所以必须单独所用一个信道来管理 DWDM 设备方便。DWDM 系统可以增加一个波长信道专用于对系统的管理，这个信道就是所谓的光监控信道（Optical Supervising Channel—OSC）对于采用掺铒光纤放大器（EDFA）技术的光线路放大器，EDFA 的增益区为 1530 nm~1565 nm，光监控通路必须位于 EDFA 有用增益带宽的外面（带外 OSC），为 1510 nm。监控通路采用信号翻转码 CMI 为线路码型。

3.5.1 光监控通路要求

DWDM 对光监控信道有以下要求：

光监控通道不限制光放大器的泵浦波长；

光监控通道不限制两个光线路放大器之间的距离；

光监控通道不限制未来在 1310nm 波长的业务；

线路放大器失效时光监控通道仍然可用；

根据以上要求：

（1）光监控信道的波长不能为 980nm，1480nm，因为掺铒光纤放大器（EDFA）使用以上波长的激光器作泵浦源，拉曼光纤放大器也使用 1480nm 附近波长的激光器作泵浦源；

(2) 光监控信道的波长不能为 1310nm，因为这样会占用了 1310 窗口的带宽资源，妨碍了 1310nm 窗口的业务；

光监控信道的接收灵敏度可以做得很高，这样一来，不会因为 OSC 的功率问题限制站点距离，具体是两个光放大器之间的距离。因此光监控信道需要采用低速率的光信号，保证较高的接收灵敏度。

(3) 光监控信道的波长在光放大器的增益带宽以外，这样光放大器失效时光监控通道不会受影响。对于采用掺铒光纤放大器 (EDFA) 技术的光线路放大器，EDFA 的增益光谱区为 1528~1610nm，因此，光监控通道波长必须位于 EDFA 的增益带宽的之外。通常，光监控信道的波长可以为 1510nm，或 1625nm。

按照 ITU-T 的建议，DWDM 系统的光监控信道应该与主信道完全独立，主信道与监控信道的独立在信号流向上表现的也比较充分。在 OTM 站，在发方向，监控信道是在合波、放大后才接入监控信道的；在收方向，监控信道是首先被分离的，之后系统才对主信道进行预放和分波。同样在 OLA 站点，发方向，是最后才接入监控信道；收方向，最先分离出监控信道。可以看出：在整个传送过程中，监控信道没有参与放大，但在每一个站点，都被终结和再生了。这点恰好与主信道相反，主信道在整个过程中都参与了光功率的放大，而在整个线路上没有被终结和再生，波分设备只是为其提供了一个透明的光通道。

3.5.2 监控通路接口参数

监控通路的接口参数如表 1-4。

表 1-4 监控通路的接口参数

| | |
|--------------|-------------|
| 监控波长 | 1510nm |
| 监控速率 | 2Mbit/s |
| 信号码型 | CMI |
| 信号发送功率 | (0~-7dBm) |
| 光源类型 光谱特性 | MLM LD * |
| 最小接收灵敏度 | -48dBm |

3.5.3 监控通路的帧结构

监控通路的 2Mbit/s 系统物理接口应符合 G.703 要求。其帧结构和比特率符合 G.704 的规定，如图 1-23 所示。

| | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|-------|----|----|-------|----|----|----|
| 0 | 1 | 2 | 3 | | 16 | 17 | | 29 | 30 | 31 |
|---|---|---|---|-------|----|----|-------|----|----|----|

图 1-23 监控通路的帧结构

时隙 0：帧同步字节。

帧结构中至少有 2 个时隙作为公务联络通路，一个作为光中继段公务联络，可在光放大器中继站上接入。另一个作为光复用段之间的业务联络，可在 WDM 系统终端站接入。

帧结构中至少有 1 个时隙供使用者(通常为网络提供者)使用，可以在光线路放大器中继站上接入。

帧结构中必须有 4 个字节作为光中继段的 DCC 通道，8 个字节作为光复用段的 DCC 通道，以传送有关 WDM 系统的网络管理信息。终端设备有公务联络和使用者通路两个接口。

至少有空闲字节，以准备扩容时采用。

3.6 思考题

- 1) 什么是电吸收激光调制方式和 M-Z 调制方式？
- 2) 波分复用器有哪几种类型，各有什么特点？
- 3) 光放大器有哪几种？简述 EDFA 的增益平坦控制和增益锁定？
- 4) DWDM 的光监控信道的波长和监控速率是多少？

带格式的[]：项目符号和编号

4 DWDM 光传输系统的技术规范

目标：

了解 ITU-T 有关 WDM 系统的建议及相关规范。

4.1 ITU-T 有关 WDM 系统的建议

国际电联 ITU-T 在 WDM 方面做了大量的工作，相关的建议主要有：

ITU-T 建议 G.652(1993) 单模光纤光缆的特性

ITU-T 建议 G.653(1993) 色散位移单模光纤光缆的特性

ITU-T 建议 G.655(1996) 非零色散单模光纤光缆的特性

ITU-T 建议 G.661(1993) 光纤放大器的相关通用参数的定义和测试方法

ITU-T 建议 G.662(1994) 光纤放大器设备和子系统的主要特性

ITU-T 建议 G.663(1996) 与光放大器有关传输问题

ITU-T 建议 G.671(1996) 无源光器件要求

ITU-T 建议 G.681(1997) 使用光放大器，包括光复用器的局间和长途线路系统的功能特性

ITU-T 建议 G.691(1997) 有光放大器 SDH 单通路系统和 STM-64 系统的光接口

ITU-T 建议 G.692(1998) 有光放大器多通路系统的光接口

4.2 传输通道参考点的定义

为了规范光接口参数，ITU-T G.692 文件定义了 WDM 光传输系统的全部参考点，如图所示。Tx 1, Tx 2, TxN 通常是系统的终端发送机，在发送端采用波分复用器（合波器），将不同规定波长的信号光载波合并起来并送入一根光纤进行传输。在接收端，再由一波分复用器（分波器）将这些不同波长承载不同信号的光载波分开。

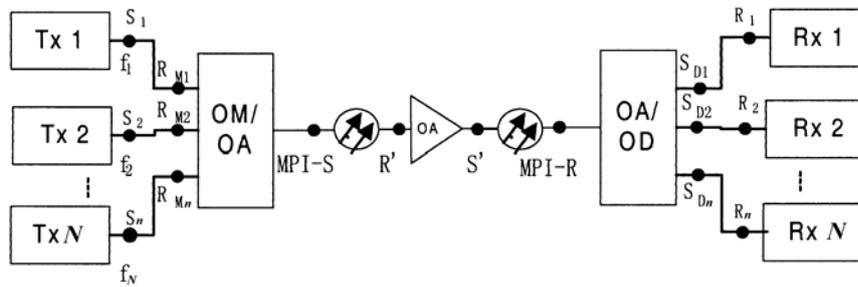


图 1-24 WDM 光接口参考点

图中所示的 WDM 系统具有下列参考点：

$S_1 \cdots S_n$: 通路 $1 \cdots n$ 在发射机光输出连接器处光纤上的参考点；

$R_{M1} \cdots R_{Mn}$: 通路 $1 \cdots n$ 在 OM/OA 的光输入连接器处光纤上的参考点；

MPI-S: OM/OA 的光输出连接器后面光纤上的参考点；

S': 线路光放大器的光输出连接器后面光纤上的参考点；

R': 线路光放大器的光输入连接器前面光纤上的参考点；

MPI-R: OA/OD 的光输入连接器前面光纤上的参考点；

$S_{D1} \cdots S_{Dn}$: 是 OA/OD 的光输出连接器处的参考点；

$R_1 \cdots R_n$: 接收机光输入连接器处的参考点。

4.3 光波长区的分配

- 光纤有两个长波长的低损耗窗口，1310nm 窗口和 1550nm 窗口，均可用于光信号传输，但由于目前常用的掺铒光纤放大器的工作波长范围为 192.1~196.1THz。因此，光波分复用系统的工作波长区为 192.1~196.1THz。
- 标称中心频率指的是光波分复用系统中每个通路对应的中心波长。在 G.692 中允许的通路频率是基于参考频率为 193.1THz、最小间隔为 100GHz 或 50GHz 的频率间隔系列。
- WDM 信道的标准波长分等间隔和不等间隔两种配置方案。不等间隔是为了避免四波混频效应的影响。鉴于使用 G.652 和 G.655 光纤的 WDM 系统中没有观察到四波混频效应的明显影响，因此 G.692 文件对于使用 G.652 和 G.655 光纤的 WDM 系统推荐使用的标准波长如表 1-5。



表 1-5 标准中心频率

| 标准中心频率(THz) 50 GHz间隔 | 标准中心频率(THz) 100 GHz间隔 | 标准中心波长 (nm) |
|-------------------------|--------------------------|----------------|
| 196.10 | 196.10 | 1528.77 |
| 196.05 | — | 1529.16 |
| 196.00 | 196.00 | 1529.55 |
| 195.95 | — | 1529.94 |
| 195.90 | 195.90 | 1530.33 |
| 195.85 | — | 1530.72 |
| 195.80 | 195.80 | 1531.12 |
| 195.75 | — | 1531.51 |
| 195.70 | 195.70 | 1531.90 |
| 195.65 | — | 1532.29 |
| 195.60 | 195.60 | 1532.68 |
| 195.55 | — | 1533.07 |
| 195.50 | 195.50 | 1533.47 |
| 195.45 | — | 1533.86 |
| 195.40 | 195.40 | 1534.25 |
| 195.35 | — | 1534.64 |
| 195.30 | 195.30 | 1535.04 |
| 195.25 | — | 1535.43 |
| 195.20 | 195.20 | 1535.82 |
| 195.15 | — | 1536.22 |
| 195.10 | 195.10 | 1536.61 |
| 195.05 | — | 1537.00 |
| 195.00 | 195.00 | 1537.40 |
| 194.95 | — | 1537.79 |
| 194.90 | 194.90 | 1538.19 |
| 194.85 | — | 1538.58 |
| 194.80 | 194.80 | 1538.98 |
| 194.75 | — | 1539.37 |
| 194.70 | 194.70 | 1539.77 |
| 194.65 | — | 1540.16 |
| 194.60 | 194.60 | 1540.56 |
| 194.55 | — | 1540.95 |
| 194.50 | 194.50 | 1541.35 |
| 194.45 | — | 1541.75 |
| 194.40 | 194.40 | 1542.14 |
| 194.35 | — | 1542.54 |
| 194.30 | 194.30 | 1542.94 |
| 194.25 | — | 1543.33 |
| 194.20 | 194.20 | 1543.73 |
| 194.15 | — | 1544.13 |
| 194.10 | 194.10 | 1544.53 |
| 194.05 | — | 1544.92 |
| 194.00 | 194.00 | 1545.32 |
| 193.95 | — | 1545.72 |
| 193.90 | 193.90 | 1546.12 |
| 193.85 | — | 1546.52 |
| 193.80 | 193.80 | 1546.92 |
| 193.75 | — | 1547.32 |
| 193.70 | 193.70 | 1547.72 |
| 193.65 | — | 1548.11 |
| 193.60 | 193.60 | 1548.51 |
| 193.55 | — | 1548.91 |
| 193.50 | 193.50 | 1549.32 |
| 193.45 | — | 1549.72 |
| 193.40 | 193.40 | 1550.12 |

| 标准中心频率(THz) 50 GHz间隔 | 标准中心频率(THz) 100 GHz间隔 | 标准中心波长 (nm) |
|-------------------------|--------------------------|----------------|
| 193.35 | – | 1550.52 |
| 193.30 | 193.30 | 1550.92 |
| 193.25 | – | 1551.32 |
| 193.20 | 193.20 | 1551.72 |
| 193.15 | – | 1552.12 |
| 193.10 | 193.10 | 1552.52 |
| 193.05 | – | 1552.93 |
| 193.00 | 193.00 | 1553.33 |
| 192.95 | – | 1553.73 |
| 192.90 | 192.90 | 1554.13 |
| 192.85 | – | 1554.54 |
| 192.80 | 192.80 | 1554.94 |
| 192.75 | – | 1555.34 |
| 192.70 | 192.70 | 1555.75 |
| 192.65 | – | 1556.15 |
| 192.60 | 192.60 | 1556.55 |
| 192.55 | – | 1556.96 |
| 192.50 | 192.50 | 1557.36 |
| 192.45 | – | 1557.77 |
| 192.40 | 192.40 | 1558.17 |
| 192.35 | – | 1558.58 |
| 192.30 | 192.30 | 1558.98 |
| 192.25 | – | 1559.39 |
| 192.20 | 192.20 | 1559.79 |
| 192.15 | – | 1560.20 |
| 192.10 | 192.10 | 1560.61 |

4.4 思考题

- 1) ITU-T 有关 WDM 部分涉及到那些建议？
- 2) 光波分复用系统的绝对参考频率是多少？信道间隔是多少？

5 专用词汇及缩略语

| 英文缩写 | 英文解释 | 中文解释 |
|-------|--|--------------|
| ADM | Add and Drop Multiplexer | 分插复用器 |
| AGC | Automatic Gain Control | 自动增益控制 |
| ALC | Automatic Level Control | 自动功率控制 |
| ALS | Automatic Laser Shutdown | 激光器自动关闭 |
| APD | Avalanche Photo Diode | 雪崩光电二极管 |
| APR | Automatic Power Reduction | 自动功率减小 |
| ASE | Amplified Spontaneous Emission | 放大的自发辐射 |
| AWG | Arrayed Waveguide Grating | 阵列波导光栅 |
| BA | Booster Amplifier | 功率放大器 |
| BER | Bit Error Ratio | 误码率 |
| CLNS | Connectionless Network Layer Service | 无连接的网络层服务 |
| CMI | Coded Mark Inversion | 传号反转码 |
| CRC | Cyclical Redundancy Check | 循环冗余校验 |
| CSES | Continuous Severely Errored Second | 连续严重误码秒 |
| CWDM | Coarse Wavelength Division Multiplex | 稀疏波分复用 |
| DCC | Data Communication Channel | 数据通信通路 |
| DCF | Dispersion Compensation Fibre | 色散补偿光纤 |
| DCM | Dispersion Compensation Module | 色散补偿模块 |
| DCN | Data Communication Network | 数据通信网 |
| DDN | Digital Data Network | 数字数据网 |
| DFB | Distributed Feedback | 分布反馈 |
| DSP | Digital Signal Processing | 数字信号处理 |
| DWDM | Dense Wavelength Division Multiplex | 密集波分复用 |
| ECC | Embedded Control Channel | 嵌入式控制通道 |
| EDFA | Erbium-Doped Fibre Amplifier | 掺铒光纤放大器 |
| ETSI | European Telecommunication Standards Institute | 欧洲电信标准协会 |
| FEC | Forward Error Correction | 前向纠错 |
| FIFO | First In First Out | 先进先出 |
| GE | Gigabit Ethernet | 千兆比特以太网 |
| GUI | Graphical User Interface | 图形用户界面 |
| IEEE | Institute of Electrical and Electronic Engineers | 国际电力电子工程师协会 |
| ITU-T | International Telecommunication Union-Telecommunication Sector | 国际电信联盟-电信标准部 |
| LA | Line Amplifier | 线路放大器 |
| LAN | Local Area Network | 局域网 |
| LCN | Local Communication Network | 本地通信网 |
| LCT | Local Craft Terminal | 本地维护终端 |
| LD | Laser Diode | 激光二极管 |
| MCF | Message Communication Function | 消息（报文）通信功能 |
| MD | Mediation Device | 中介设备 |
| MPI-R | Main Path Interface at the Receiver | 接收机主信道接口 |
| MPI-S | Main Path Interface at the Transmitter | 发送机主信道接口 |
| NE | Network Element | 网元 |
| NF | Noise Figure | 噪声指数 |
| NRZ | Non Return to Zero | 非归零码 |
| OA | Optical Amplifier | 光放大器 |
| OADM | Optical Add and Drop Multiplexer | 光分插复用设备 |
| OD | Optical Demultiplexing | 光解复用 |



| 英文缩写 | 英文解释 | 中文解释 |
|--------|--|-------------|
| ODF | Optical Distribution Frame | 光纤配线架 |
| OHP | Overhead Processing | 开销处理 |
| OLA | Optical Line Amplifier | 光线路放大设备 |
| OM | Optical Multiplexing | 光复用 |
| OS | Operations System | 操作系统 |
| OSC | Optical Supervisory Channel | 光监控通道 |
| OSI | Open Systems Interconnection | 开放系统互连 |
| OSNR | Optical Signal/Noise Ratio | 光信噪比 |
| OTM | Optical Terminal Multiplexer | 光终端复用设备 |
| OTU | Optical Transponder Unit | 光发送单元 |
| PA | Pre-amplifier | 前置放大器 |
| PDH | Plesiochronous Digital Hierarchy | 准同步数字系列 |
| PIN | Positive Intrinsic Negative | PIN光电二极管 |
| PON | Passive Optical Network | 无源光网络 |
| SCC | System Control & Communication | 系统控制与通信 |
| SDH | Synchronous Digital Hierarchy | 同步数字系列 |
| SNCP | Subnetwork Connection Protection | 子网连接保护 |
| STM | Synchronous Transport Module | 同步传送模块 |
| TCP/IP | Transport Control Protocol/Internet Protocol | 传输控制协议/网间协议 |
| TMN | Telecommunication Management Network | 电信管理网 |
| TTL | Transistor-Transistor Logic | 晶体管-晶体管逻辑 |
| WDM | Wavelength Division Multiplex | 波分复用 |
| WS | Work Station | 工作站 |