

实验六 光纤波分复用技术

一 实验目的

1. 了解光纤波分复用技术的工作原理，并实现语音和图像的光纤传输。
2. 了解模拟和数字光信号的调制与传输原理。

二 实验原理

2.1 WDM的基本概念和原理

波分复用技术 (wavelength-division multiplexing, 简称WDM) 是将多个载有信息 (称为信号调制, 信号发射的过程), 但是中心波长不同的光信号合成一束, 使其沿着单根光纤传输; 并且在接收端再用某种方法, 将各个不同波长的光信号分开的通信技术[19]。如图6.1所示。利用该技术可以同时在一根光纤上传输多路信号, 每一路信号都由某个特定波长的光波传送, 这就是WDM中的一个信道。WDM技术的提出与应用, 对光纤通信产生了革命性的影响和巨大的推动。

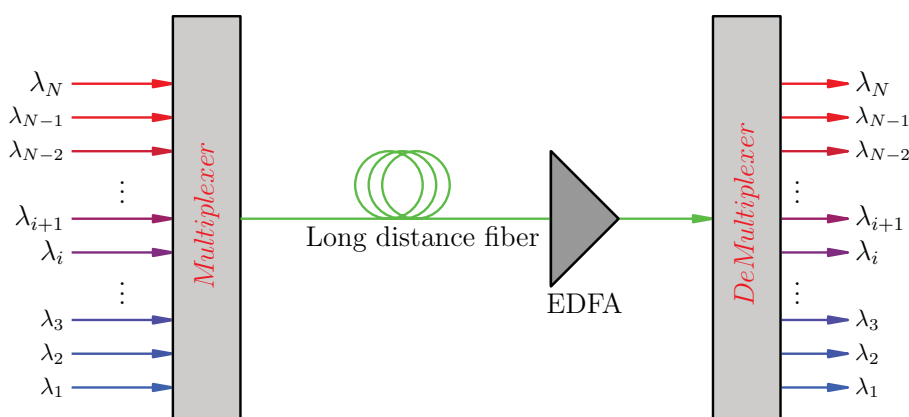


图 6.1: 光纤波分复用技术原理示意图。

WDM技术的核心思想是在光纤的通信窗口中, 用不同波长的光波作为一个信道, 传输一路信号。因此将信道分的越密, 即不同信道间隔越小, 所允许的信道数就越多, 容量越大。通信窗口内可分为两波、四波、八波、十六波等。如果其中所分的信道数很少, 信道间隔较大, 则称为粗波分复用 (CWDM) 技术 (Coarse wavelength-division multiplexing, 简称CWDM)。如果所分信道很密, 则称为密集波分复用 (DWDM) 技术 (density wavelength-division multiplexing, 简称DWDM)。WDM技术有很多的优点, 概括起来讲有如下几条:

1. 充分利用光纤的低损耗波段, 极大的增加光纤的传输容量, 使光纤传送信息的能力增加数倍。目前我们只是利用了光纤低损耗谱(1310nm-1550nm)较少的一部分, 波分复用可以充分利用单模光纤的巨大带宽约25THz, 传输潜力非常巨大。
2. 具有在同一根光纤中, 传送数个非同步信号的能力。有利于数字信号和模拟信号的兼容, 与数据速率和调制方式无关。在线路中间可以灵活取出或加入信道。
3. 对已建光纤系统, 尤其早期铺设的芯数不多的光缆, 只要原系统有功率余量, 可进一步增家数据容量, 实现多个单向信号或双向信号的传送而不用对原系统作大改动, 具有较强的灵活性。
4. 由于大量减少了光纤的使用量, 有源光设备的共享, 大大降低了建设成本, 由于光纤数量少, 当出现故障时, 恢复起来也迅速方便。

光纤的种类和相应的标准有ITU-T组织指定, ITU-T的中文含义是“国际电信联盟远程通信标准化组” (ITU-T代表ITU Telecommunication Standardization Sector), 它是国际电信联盟 (ITU代

表International Telecommunication Union International telecommunication union) 管理下的专门制定远程通信相关国际标准的组织。关于ITU-T更详细的信息请参考“<http://www.itu.int/ITU-T/>”，以及参考文献[20]。ITU-T首先在建议G.651中定义了一种多模光纤。由于单模光纤具有低损耗、带宽大、易于扩容和成本低等特点，目前国际上已一致认同SDH/DWDM光传输系统使用单模光纤作为传输媒质。ITU-T在G.652、G.653、G.654和G.655建议(Recommendation)中分别定义了四种单模光纤，这些光纤的基本特性如下：

1. G.651光纤：G.651光纤是一种折射率渐变型多模光纤，主要应用于850nm和1310nm两个波长区域的模拟或数字信号传输。其纤芯直径为50 μm ，包层直径125 μm 。在850nm波长区衰减系数低于4dB/km，色散系数低于120ps/nm·km；在1310nm波长区衰减系数低于2dB/km，色散系数低于6ps/nm·km。
2. G.652光纤：G.652光纤即指零色散点在1310nm波长附近的常规单模光纤，这也是到目前为止得到最为广泛应用的单模光纤。可以应用在1310nm和1550nm两个波长区域，但在1310nm波长区域具有零色散点，低达3.5ps/nm·km以下。在1310nm波长区，其衰减系数也较小，规范值为0.3~0.4dB/km(实际光纤的衰减系数低于该规范值)。故称其为1310nm波长性能最佳光纤。

在1550nm波长区域，G.652光纤呈现出极低的衰减，其衰减系数规范值为0.15~0.25dB/km。但在该波长区的色散系数较大，一般约20ps/nm·km。由于在1310nm波长区域目前还没有商用化的光放大器，解决不了超长距离传输的问题，所以G.652光纤虽然称为1310nm波长性能最佳光纤，但仍然大部分工作于1550nm波长区域。

在1550nm波长区域，用G.652光纤传输TDM方式的2.5Gb/s的SDH信号或基于2.5Gb/s的WDM信号是没有问题的，因为后者对光纤的色散要求仍相当于单波长2.5Gb/s的SDH系统的要求。但用来传输10Gb/s的SDH信号或基于10Gb/s的WDM信号则会遇到问题。这是因为一方面G.652光纤在该波长区的色散系数较大，会出现色散受限的问题；另一方面还出现了偏振模色散(PMD)受限的问题。

3. G.653光纤：G.653光纤即零色散点在1550nm波长附近的常规单模光纤，又称色散移位光纤。它主要应用于1550nm波长区域，且在1550nm波长区域的性能最佳。因为在光纤制造时已对光纤的零色散点进行了移位设计，即通过改变光纤内折射率分布的办法把光纤的零色散点从1310nm波长移到1550nm波长处，所以它在1550nm波长区域的色散系数最小，低达3.5ps/nm·km以下。而且其衰减系数在该波长区也呈现出极小的数值，其规范值为0.19~0.25dB/km。故称其为1550nm波长性能最佳光纤。

在1550nm波长区域，因为G.653光纤的色散系数极小，所以特别适合传输单波长、大容量的SDH信号。例如用它来传输TDM方式的10Gbit/s的SDH信号是没有问题的。但是，用它来传输WDM信号则会遇到麻烦，即出现严重的四波混频效应(FWM)。考虑到今后网络设备将向超大容量密集波分复用系统方向发展，今后网上不宜使用G.653光纤。

4. G.654光纤：G.654光纤又称1550nm波长衰减最小光纤，它以努力降低光纤的衰减为主要目的，在1550nm波长区域的衰减系数低达0.15~0.19dB/km，而零色散点仍然在1310nm波长处。G.654光纤主要应用于需要中继距离很长的海底光纤通信，但其传输容量却不能太大。
5. G.655光纤：G.655光纤是近几年涌现的新型光纤，基本设计思想是在1550nm窗口工作波长区具有合理的、较低的色散，足以支持10Gbit/s以上速率的长距离传输而无需色散补偿，从而节省了色散补偿器件及其附加光放大器的成本；同时，其色散值又保持非零特性，具有最小数值限制，足以压制四波混频和交叉相位调制等非线性影响，同时满足TDM和WDM两种发展方向的需要。因此，G.655光纤可以用来传输单个载波上信号速率为2.5Gbit/s或10Gbit/s的WDM光信号，复用的波长通道数量可达几十、几百个。

表 6.1: 光纤通讯波段名称表

波段符号	波段名称英文全称	对应波长范围
O-band	Original band	1260nm 到1360nm
E-band	extended band	1360nm 到1460nm
S-band	short wavelength band	1460nm 到1530nm
C-band	conventional band	1530nm 到1565nm
L-band	long wavelength band	1565nm 到1625nm
U-band	ultra-long wavelength band	1625nm 到1675nm

信道间隔与信道数目

粗波分复用技术(Coarse WDM, 简称CWDM)适用于短距离的数据传输，比如小于50km或者更短

的距离。传输过程中不需要中继器和放大器。CWDM系统常用激光器的码率为2.5Gbps，同时能容纳18个波长信道，因此单根光纤最大能提供45Gbps的数据传输速率。在ITU标准G.694.2中，规定CWDM系统的信道间隔为20nm，或者2500GHz，波长范围从1270nm到1610nm。CWDM的发射和接收设备中可以使用低价位的DFB激光器，这种激光器不需要额外的冷却设备。

密集波分复用技术（Dense WDM，简称DWDM）适用于长距离，大数据量的数据传输，例如目前广泛应用的国际互连网。此时CWDM的信道数目和传输速率明显不能满足实际需求。通常情况下，DWDM系统的激光信号速率为10Gbps，能同时复用数百个信道。因此单根光纤可以提供数Tbps的传输速率。新一代的DWDM系统能够支持40-Gbps的信号速率和300个信道，因此单根光纤就达到了12Tbps的带宽。如此巨大的数据传输量导致功率消耗和器件发热量都很大，所以DWDM系统一般需要制冷系统。

ITU-T标准G.694.1中规定DWDM系统的信道间隔为100GHz或50GHz。实际应用中的信道间隔有200GHz（1.6nm），100GHz（0.8nm），50GHz（0.4nm），25GHz（0.2nm），12.5GHz（0.1nm）几种，最大的信道数达到300甚至更多。DWDM系统中采用中继放大（EDFA），传输距离可达数千公里。G.694.1建议规定了DWDM所用的频率格点，具体数据如表6.2所示。

表 6.2: ITU G.694.1频率格点

L波段		C波段		S波段	
100GHz频率间隔					
THz	nm	THz	nm	THz	nm
186.00	1611.79	191.00	1569.59	196.00	1529.55
186.10	1610.92	191.10	1568.77	196.10	1528.77
186.20	1610.06	191.20	1567.95	196.20	1527.99
186.30	1609.16	191.30	1567.13	196.30	1527.22
186.40	1608.33	191.40	1566.31	196.40	1526.44
...
190.70	1572.06	195.70	1531.90	200.70	1493.73
190.80	1571.24	195.80	1531.12	200.80	1492.99
190.90	1570.42	195.90	1530.33	200.90	1492.25

2.2 复用器于解复用器的原理

波分复用技术中的关键器件是光波的复用器和解复用器，他们分别处于光纤的两端，负责将不同波长的光信号耦合进同一跟光纤，以及将不同信号从单根光纤中分离出来的作用，二者的工作原理是一样的。复用器要求复用的信道数量足够多，插入讯号要足够小，信道的隔离度要高，同时带宽要足够宽。目前人们常用的解复用器工作原理有薄膜滤波器、衍射光栅、波导阵列光栅、FP腔滤波器、声光调谐滤波器、马赫—曾德干涉仪、级联滤波器等等。

薄膜结构的滤波器是采用两种折射率不同的介质交替排列，组成一种一维光子晶体结构，并引入特定结构的缺陷，从而实现滤波的功能。如图6.2所示。通常滤波器是由很多层不同材料（折射率分别为 n_1 和 n_2 ）、以及不同厚度的介质膜，按照设计要求组合起来。每层薄膜的光学厚度通常为 $\lambda_0/4$ 。根据理论分析可知，在波长为 λ_0 附近，会出现一个频率带 $\omega_0 \pm \Delta\omega$ ，在带内的光入射时会发生全反射。但是，当在薄膜层中间引入一个缺陷层时，如图6.2所示，此时会在带内出现一个频率 ω_1 ，该频率的透射为1，而反射为0，因此得到了很好性能的滤波。

基于光栅结构的复用 / 解复用器属于色散型器件。通常是在玻璃衬底上沉积环氧树脂，然后在环氧树脂上刻蚀出光栅线，构成所谓闪耀光栅，如图6.3所示。当入射信号照射光栅时，由于光栅的角色散作用，不同波长信号的衍射方向不同，然后经透镜会聚，可以耦合到不同的输出光纤，从而完成波长选择功能；逆过程也成立。闪耀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。

基于阵列波导光栅（Arrayed Waveguide Grating，简称AWG）的复用/解复用器是以集成光学技术为基础的平面波导型器件，如图6.4所示。典型的制造方法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。当不同波长的光信号从输入端口输入后，在长度不同的波导内传输，在透射端口，不同波导信道内的透射光相干，导致只在特定出口得到很强的输出，从而实现了波长分离的效果。该器件可以集成流水线生产，具有波长间隔小、通道数多、通带平坦等优点，非常适合于超高速、大容量DWDM系统使用，具有很大的应用前景。

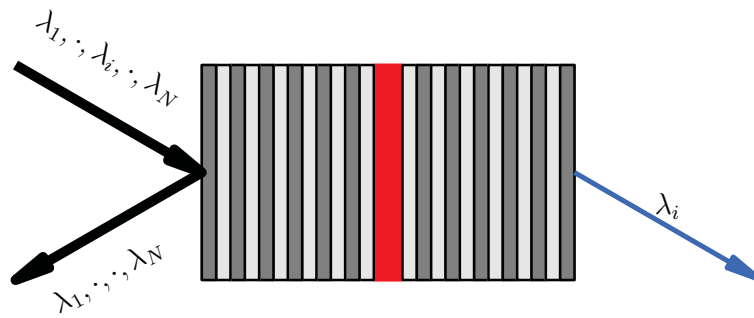


图 6.2: 基于干涉滤波器的复用 / 解复用器。

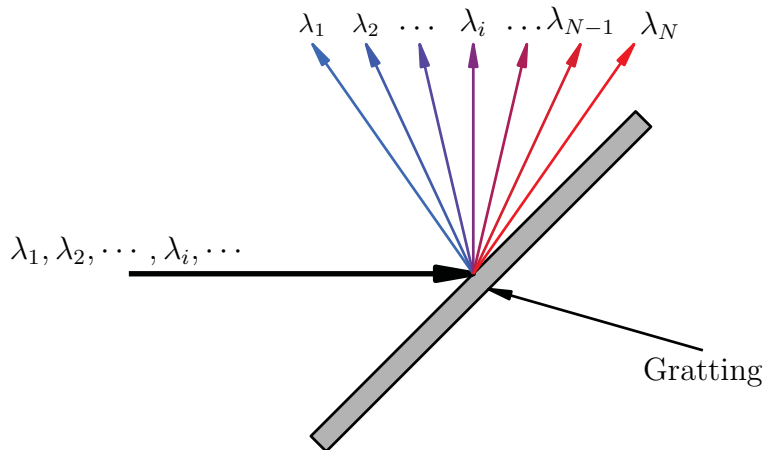


图 6.3: 基于衍射光栅的复用 / 解复用器。

定向耦合类型的复用 / 解复用器有两类，其结构示意图如图6.5所示。应用较广泛的是熔锥式光纤耦合器，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所需要的耦合功率。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。熔锥型光复用/解复用器制造简单，应用广泛。

2.3 信号的调制和发射

将电信号转变为光信号的方式通常有两种：直接调制和间接调制。直接调制方法适用于半导体光源，它将要传送的信息转变为电流信号注入光源，获得相应的光信号输出，是一种光强度调制(IM)。间接调制是利用晶体的电光、磁光和声光效应等性质对光辐射进行调制，可以采用铌酸锂调制器、电吸收调制器，和干涉型调制器实现。对强度调制直接检测(IM/DD)光波系统，并非一定要采用外调制方案，但在高速长距离光波系统中，采用间接调制有利于提高系统性能。

直接调制技术具有简单、经济和容易实现等优点，由于光源的输出光功率基本上与注入电流成正比，因此调制电流变化转换为光频调制是一种线性调制。按调制信号的形式，光调制可分为模拟信号调制和数字信号调制两种。

模拟信号调制是直接用连续的模拟信号（如语音和视频信号）对光源进行调制，如图6.6所示，连续的模拟信号电流叠加在直流偏置电流上。适当选择直流偏置电流的大小，可以减小光信号的非线性失真。数字信号调制主要指PCM编码调制，先将连续变化的模拟信号通过取样、量化和编码，转换成一组二进制脉冲代码，用矩形脉冲的1码、0码来表示信号，如图6.6(b)和(c)所示。

三 实验装置与操作

本实验要求正确搭建光路，将摄像头采集到的图像和声音的电信号，利用直接调制原理，转换为光信号（分别加载到1310nm和1550nm两个激光器上）。然后利用WDM技术，将两路光信号输入到光纤内进行长距离传输（约4km）。在另一端再将两光信号分离，转换为电信号，并驱动一显示器，得到摄像头所采集到的数据，从而完成WDM技术的整个过程。

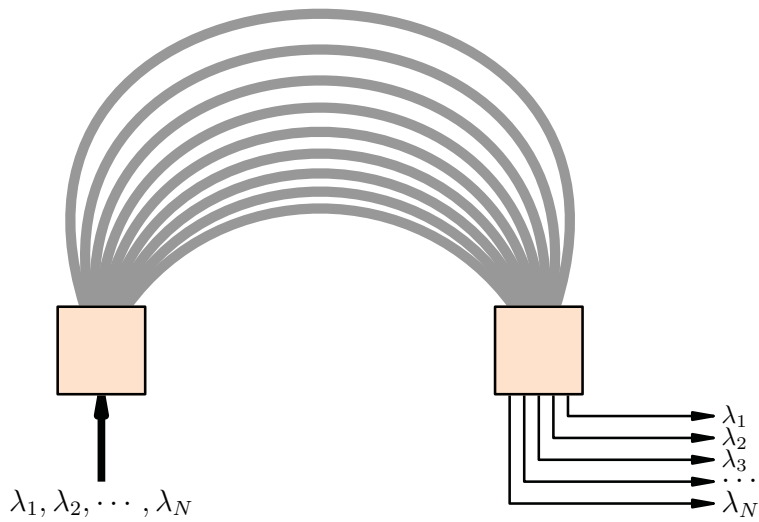


图 6.4: 基于波导阵列结构的复用 / 解复用器。

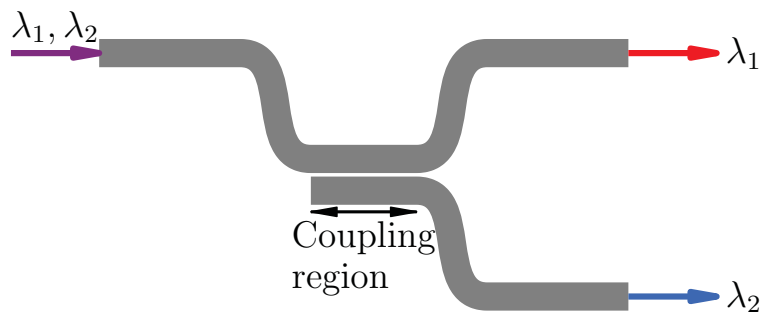


图 6.5: 基于定向耦合结构的复用器。

3.1 实验光路图

实验所用光路如图6.7所示。

3.2 实验操作步骤

1. 按图6.7所示结构进行实验系统连接，检查无误后打开系统电源。
2. 将1550nm激光器输出连接至OPM输入,使用模拟调制方式在单模光纤中传输视频信号。
 - (a) 将微型摄像头的视频输出信号连接至示波器CH1输入，观察并记录视频信号波形和幅度。
 - (b) 设置LD2工作模式(MOD)为模拟调制模式(OAM)，1550nm激光器输出光功率受6MHz带宽视频信号调制。
 - (c) 将OPM监控输出信号DDM连接至示波器CH2输入，调节LD2偏置电流(I_c)和OPM增益(RTO)，使得光接收机监控信号波形与微型摄像头的视频输出信号波形一致。

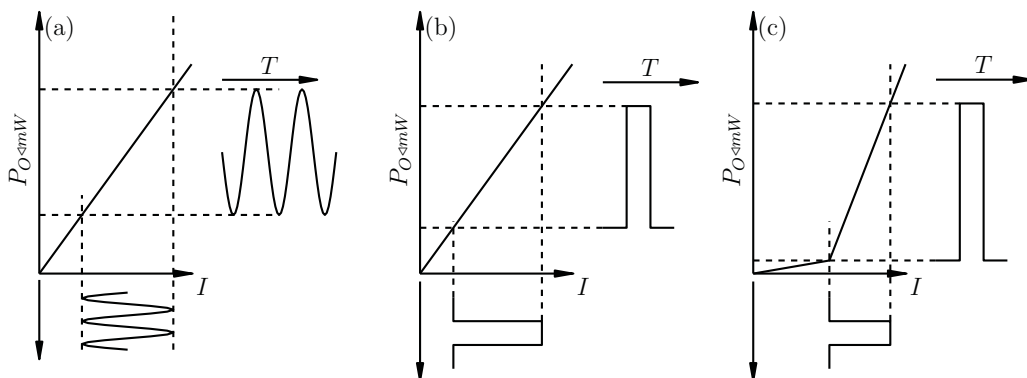


图 6.6: 半导体光源的直接调制原理。(a)LED模拟调制；(b)LED数字调制；(c)LD数字调制。

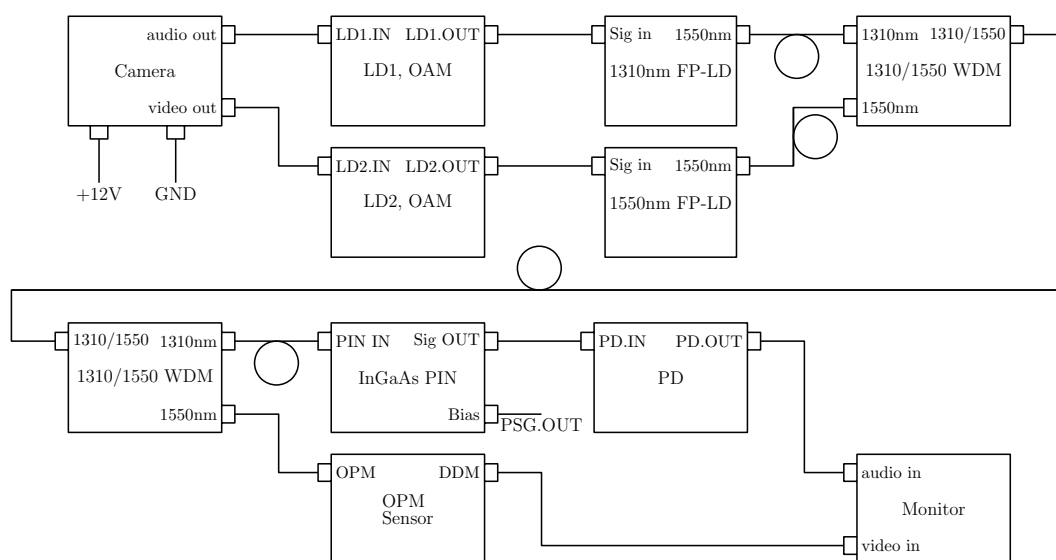


图 6.7: 光纤通信波分复用技术的实验光路图。

- (d) 将OPM监控输出信号DDM连接至监视器视频输入端Video.In, 微调LD2偏置电流(I_c), 使得监视器图像有最小失真。
3. 将1310nm激光器输出直接连接至InGaAs PIN光电二极管输入, 设置LD1工作模式(MOD)为模拟调制模式(OAM), 1310nm激光器输出光功率受语音信号调制。
- (a) 将InGaAs PIN光电二极管偏压输入端连接至PSG.OUT, PSG置于高压源模式(HVS), 输出电压调至-10V。
- (b) 将光电信号检测器PD监控输出信号PD.OUT连接至监视器音频输入端Audio.In, 调节LD₁偏置电流(I_c)和PD增益(RTO), 使得监视器声音输出有最小失真。
4. 将两个WDM和G.652单模光纤按图6.7所示结构接入实验系统, 使用1550nm传输视频信号, 使用1310nm传输语音信号, 进行单模光纤波分复用技术实验, 得到长距离传输后的输出图像。
- (a) 微调LD2偏置电流(I_c), 使得监视器图像有最小失真。
- (b) 微调LD1偏置电流(I_c), 使得监视器声音输出有最小失真。

注意事项

为了同学们的安全, 以及实验的顺利完成, 实验中要特别注意以下几点:

1. 系统上电后禁止将光纤连接器对准人眼, 以免灼伤。
2. 光纤连接器陶瓷插芯表面光洁度要求极高, 除专用清洁布外禁止用手触摸或接触硬物; 空置的光纤连接器端子必须插上护套。
3. 所有光纤均不可过于弯曲, 除特殊测试外其曲率半径应大于30mm。

四 思考题

实验完成后, 请思考并回答如下的问题:

1. WDM技术的基本原理是什么? 有什么优点?
2. WDM技术中最关键的复用器和解复用器是如何实现的; 就本实验中所有用的复用器/解复用器为例, 进行详细说明。
3. 如何使用两套设备在一根单模光纤中进行双向可视电话传输? 请画出系统光路。