

# 波分复用器的技术和应用

宋金声

本文作者宋金声先生，电子工业部第 23 研究所高级工程师。

## 一 前言

波分复用器(WDM)是使两个或两个以上波长的光信号在同一根光纤中进行传输的无源器件，一般应有波长分割复用器和解复用器分置于光纤的两端。日本称之为合波/分波器。美国有时称之为 WDM Coupler。它们是波分复用系统中的关键器件。

波分复用器在结构上有熔融拉锥型、介质膜型、光栅型和平面型四种。其主要技术指标为插入损耗和隔离度。在光通信发展的初期，上述各种类型的波分复用器均有试验品研制出来，但目前能形成批量生产并大量应用的主要是熔融型产品。

随着光纤放大器的实用化，密集型的波分复用系统已提到议事日程上。由于熔融型结构不适用于密集型波分复用器的制造，所以其他几种结构的 WDM 又开始了新一轮的研究，国外预测它们具有良好的应用前景。本文首先分析这四种结构 WDM 的理论基础和技术特点，然后介绍这些 WDM 在光纤有线电视系统中的应用。

## 二 熔融型 WDM

熔融拉锥的方法首先是用来制造光纤耦合器的。在制造单模光纤耦合器时，耦合器输出端的光功率随拉伸长度 L 作周期性的变化。该周期还与传输光的波长  $\lambda$  有关。假设两个输出端 1、2 的功率分别为  $P_1$ 、 $P_2$ ，则

$$P_1 = P_0 \cos^2(CL)$$

$$P_2 = P_0 \sin^2(CL)$$

式中，C 为与波长  $\lambda$  有关的系数。在制造时，若监测波长为 1,300nm，当  $P_0=1$  时， $P_1$  和  $P_2$  的归一化输出变化如图 1 中的实线所示。若监测波长为 1,550nm，由于  $\lambda$  变大， $P_1$  和  $P_2$  随 L 变化的周期变小，如图 1 中的虚线所示。

由图可见。采用 1,300nm 为监测波长，在耦合至第 2.5 周期时停止拉锥，则 1,550nm 波长在 1 端有最大的输出，1,300nm 波长在 2 端有最大的输出，这就制成了 1,300nm/1,550nm 的 WDM，如图 2 所示。

同理，可以制造 980nm/1,550nm 和 1,480nm/1,550nm 的 WDM。由于 980nm 比 1,300nm 小，其振荡周期长;1,480nm 比 1,300nm 大，其振荡周期短，所以制造时的停止周期分别为 1.5 个周期和 9 个周期。

以上所述，可总结于表 1。由表 1 可见，波长间隔愈小，因其振荡周期相差愈小，所以在制造时，要达到波分复用效果所需的振荡周期数愈多。随着振荡周期数增多，振荡速度也愈来愈快，所以对于密集型的 WDM，熔融拉锥的技术是难以实现的。

图 2 所示的结构为单极熔融型 WDM，它的一般性能是:插入损耗为 0.3dB，隔离度为 20dB，带宽为 ±10nm。为提高熔融型 WDM 的隔离度和带宽，可采用串级的方法，如图 3 所示，其隔离度可达 35dB，带宽可达 ±20nm，插入损耗有所增加，为 0.6dB。

### 三 介质膜型 WDM

介质膜型波分复用器是在 1/4 节距自聚焦透镜(GRIN)组成的平行光路中引入镀膜有介质膜的各种滤波器而构成的，平行光路如图 4 所示。

根据射线光学的原理，1/4 节距自聚焦透镜的射线矩阵由下式表示:

$$\begin{bmatrix} 0 & 1/\sqrt{A} \\ -\sqrt{A} & 0 \end{bmatrix}$$

式中， $A$  为自聚焦透镜的聚焦参数。当光纤中数值孔径为 NA 的光线输入该透镜时，其输入参数可近似为:

$$\begin{bmatrix} 0 \\ NA \end{bmatrix}$$

由此可以得到输出参数(光束半径 R 和光线斜率 R')为:

$$\begin{bmatrix} R \\ R' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1/\sqrt{A} \\ -\sqrt{A} & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ NA \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} NA/\sqrt{A} \\ 0 \end{bmatrix}$$

由上式可见, 输出光束的半径  $R=NA/\sqrt{A}$ , 所以称此为扩束;因其斜率  $R'=0$ , 所以又称为平行光。

当平行光输入 1/4 节距自聚焦透镜时, 其输入参数可近似为:

$$\begin{bmatrix} NA/\sqrt{A} \\ 0 \end{bmatrix}$$

由此式可以得到输出参数(光束半径  $R_1$  和光线斜率  $R_1'$ )为:

$$\begin{bmatrix} R_1 \\ R_1' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sqrt{A} & 1/\sqrt{A} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} NA/\sqrt{A} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ -NA \end{bmatrix}$$

由上式可见, 输出光束的半径  $R_1=0$ , 其斜率  $R_1'=-NA$ , 即可耦合至光纤中去, 称为聚焦。

在这扩束和聚焦的透镜之间, 形成一个平行光束, 中间插入滤波器, 通过适当的光路设计, 可以使各种波长的光合在一根光纤中传输(复用), 也可以将一根光纤中各种波长的光分路至不同的光纤(解复用)。

这种滤波器是采用在玻璃基体  $G$  上镀多层介质膜的方法制成的, 其膜层的表达式为:

$$G(HL)^p(LH)^pA$$

其中,  $H$ 、 $L$  为光学厚度, 是 1/4 波长的高、低折射率膜层,  $A$  为空气,  $p=1, 2, 3, \dots$ 。其膜层结构如图 5 所示。

由薄膜光学可知, 当膜层的光学厚度为 1/4 波长时, 有最佳的增加透射或反射的效果。当膜层的光学厚度为 1/2 波长时, 膜层对这种波长的光犹如不存在一样。由图 5 可见, 中间层  $LL$  为 1/2 波长  $\lambda_0$  的光学厚度, 对波长为  $\lambda_0$  的光不起作用, 可以略去不计, 剩下的中间层  $HH$ , 同样可以略去不计, 依此类推。由此可以看出整个膜系对波长  $\lambda_0$  的光具有同基体一样的透过率;而对于波长偏离  $\lambda_0$  的光, 因为中间层不满足半波长的条件, 于是透过率迅速下降, 这就构成了波长为  $\lambda_0$  的滤波器。

介质膜型 WDM 的典型结构如图 6 所示。这是一个四波长的密集型波分复用器, 其波长间隔为 8nm。中间的玻璃基体上分别镀有  $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$ 、 $\lambda_3$ 、 $\lambda_4$  的滤波器。当  $\lambda_1 \sim \lambda_4$  的光从同一根光纤输入时, 在第 1 通道,  $\lambda_1$  通过滤波器输出, 其他波长的光反射。在第 2 通道,  $\lambda_2$  通过滤波器输出, 其他波长的光反射。依此类推, 达到解复用的目的。如果改变传输方向, 则起波长分割复用的作用。这种类型波分复用器的波长间隔可达 3~24nm, 插入损耗为 1~2dB, 隔离度达 50~60dB。

#### 四 光栅型 WDM

光栅型 WDM 的基本原理是利用光栅的衍射，使不同波长的光分开，一般采用闪耀光栅(Blazed Grating)，又称定向光栅，其刻痕轮廓如图 7 所示。在这种光栅所产生的衍射图样中，各级主最大的位置不受刻痕形状的影响，而是由光栅方程式来确定：

$$2d \sin \alpha = K \lambda$$

式中： $d$  为光栅常数，即每道刻痕的宽度； $K$  为衍射的级数； $\lambda$  为闪耀波长； $\alpha$  为闪耀角。

这种光栅是利用硅片的各向异性制成的。图 7 中，一种是按  $70.53^\circ$  和  $\alpha$  制造，另一种是按  $109.47^\circ$  和  $\alpha$  制造，选择适当角度  $\alpha$ ，就能在波长  $\lambda$  下得到最大的衍射效率。

光栅型 WDM 的典型结构由光栅、自聚焦透镜和光纤阵列三部分组成，如图 8 所示。输入光纤将波长为  $\lambda_1 \sim \lambda_5$  的光注入  $1/4$  节距的自聚焦透镜，经扩束后形成平行光。由于是旁轴入射，平行光束以某个角度入射至闪耀光栅，在一定的光栅常数下，一定的波长总是与一定的  $\alpha$  相对应，这样就把入射的不同波长分开。波长长的衍射角大，波长短的衍射角小，于是五种波长反射至自聚焦透镜的角度就不同。在自聚焦透镜的另一端就形成输出光的不同径向位置，以便五根光纤分别接收五种波长的光，达到解复用器的目的。

这种波分复用器的最大特点是波长间隔可以很小，例如  $25\text{nm}$ ，其插入损耗一般为  $3\text{dB}$ ，隔离度可大于  $30\text{dB}$ 。但是，采用机械方法刻划的闪耀光栅，由于刻划机的周期误差和刻痕的不平整，会引起鬼线和杂散光，所以目前国内外正在着力研究光纤光栅，即利用干涉或非干涉的光源，照射特殊制造或经特殊处理的光敏光纤，使相干紫外光的条纹或通过相位掩膜的紫外光条纹“写入”光纤，形成光栅，这种光栅又称布喇格光栅(Bragg Grating)。

光纤光栅具有确定的中心反射波长，其反射率最高，可接近  $100\%$ ；带宽可小至  $0.028\text{nm}$ ；附加损耗很小，约  $1\text{dB}$  以下；体积小，器件微型化；可与其他光纤器件兼容成一体；不易受环境尘埃影响，这一系列优点使得它在制造密集型波分复用器方面有极好的应用前景。

## 五 平面型可调 WDM

以上所述的 WDM，只是对规定的波长和波长间隔才能使用，而平面型的结构，可按需要制成波长和波长间隔可调的 WDM。这种 WDM 是在电光晶体(如  $\text{LiNbO}_3$ )上利用集成光路的方法制作光波导，运用光开关的原理，使不同波长的光从不同的端口通过，以达到分波和合波的目的。可以通过对结构参数的调节，选

择复用波长的间隔;而利用电光效应,可调节中心波长。这种 WDM 具有比较好的适应性,其结构如图 9 所示。

该波导的分支区是单模的,中央区能承载最低阶的两个导模。光耦合进入一分支波导,单模传输,当到达作用区的后端时,在两个分支波导端得到两个单模传输的不同光强的光,光强值由相位差  $\Phi$  决定。调节  $\Phi$ ,可使不同波长的光在不同端口得到最大值,以达到分波的目的。反过来,如果两分支波导端同时入射两个波长的光,调节  $\Phi$ ,也可在同一端口使两个光同时得到最大值,以达到合波的目的。

计算表明,对波长间隔影响较大的是作用区的长度  $L$  和两波导区的宽度  $W$ 。 $L$  愈长, $W$  愈小,则波长间隔愈小。如果要求波长间隔为 40nm 左右,则分支波导宽  $W=7\mu\text{m}$ ,两模作用区的宽度与分支波导的宽度相等,中央波导区的长度为 10mm,对该区采用两次溅射 Ti 工艺,分支角为  $1^\circ$ ,扩散温度为  $1,050^\circ\text{C}$ ,时间为 9h。电极位于作用区两侧,电极上施加电压,即可调节相位差  $\Phi$ 。

这种 WDM 已有研制样品,其波长间隔为 43nm,电压对复用波长的调节率为 3nm/V,隔离度为 13~26dB,插入损耗为 7dB。若进一步提高  $\text{LiNbO}_3$  材料的质量、波导的质量和波导两端研磨抛光的质量,则插入损耗可以降低至实用化的水平。

## 六 应用

在光纤有线电视系统中,WDM 有着广阔的应用前景。首先是双窗口的 WDM 传输,如图 10 所示。图 10(a)为单纤的双向传输系统,左端的 1,310nm 的 LD 通过 WDM 传输至右端的 PIN 检测器;右端的 1,550nm 的 LD 通过 WDM 传输至左端的 PIN 检测器。在这种应用中,WDM 的隔离度一般在 20dB 左右即可。图 10(b)为单纤的单向多系统传输系统,左端均为光源,通过 WDM,传输至右端的各检测器。在这种应用中,WDM 的隔离度一般需要在 30dB 以上。

WDM 是光纤放大器中的重要器件。图 11 表示了后向抽运的掺铒光纤放大器,WDM 将 980nm 或 1,480nm 波长的泵浦光以与信号光相反的方向传输给掺铒光纤,使 1,550nm 波长的信号光得到放大。图 12 表示了正、反向同时抽运的掺铒光纤放大器,WDM 将泵浦光以与信号光相同、相反的方向传输给添加稀土元素的光纤,使信号光放大。

在未来的光纤有线电视传输系统中,为了增加电视频道的数量采用非压缩的数字电视技术,并与话音、数据频道相结合,需要采用密集型的波分复用技术(DWDM),就是在光纤的同一个工作窗口内,利用光纤放大器增益的谱宽

(30~35nm), 使复用波长的间隔小至数 nm 甚至小于 1nm。例如, 日本的富士通公司在 1,550nm 波长的附近, 共复用了 55 个波长, 波长之间的间隔仅为 0.6nm。每个波长的数据速率为 20Gb/s, 因此总的传输容量达到 1.1Tb/s。这是至今为止 DWDM 传输总容量最大的一次试验, 其关键的器件就是密集型的 WDM。

图 13 为未来的融有线电视、数据和话音为一体的无源光接入网(PON)。这是一种双星型的拓扑结构, 中心局(CO)通过一对光纤和远端结点(RN)与众多的用户光网络单元(ONU)相连。对于下行信号, 首先将卫星接收站接收的数字电视信号调制到  $1.3\ \mu\text{m}$  的 LED 上, 将话音和数据信号调制到  $1.55\ \mu\text{m}$  的 LED 上, 然后通过双窗口 WDM 传输给远端结点。远端结点是一个波导光栅路由选择器(WGR), 这实际上是密集型波分复用器, 它将宽带的 LED 光源分割成一系列的波长, 每个波长都具有相等的光功率, 通过各个输出端传输给相应的用户光网络单元。光网络单元再经过解复用器将广播数字电视信号通过  $1.31\ \mu\text{m}$  的接收器传输给电视机, 将数据和话音信号通过  $1.55\ \mu\text{m}$  的接收器传输给电脑和电话机。

对于上行的数据和话音信号, 用户光网络单元将其调制到  $1.31\ \mu\text{m}$  的 LED 上, 通过馈线光纤和波导光栅路由选择器传送到中心局的  $1.31\ \mu\text{m}$  的接收器上。利用时分多址技术, 中心局可以接收各用户光网络单元的数据和话音信号。

与有源光接入网相比较, 无源光接入网可以节省很多光纤和有源器件, 具有造价低、可靠性好、易于升级换代等优点, 是今后光纤用户网的主要发展方向。

综上所述, 各种应用场合下波分复用器的种类及其工作波长或波长间隔如表 2 所示。

(全文完)