

# 光纤通信讲座

## 光波复用光纤通信

董孝义

(南开大学现代光学研究所)

目前进入实用化阶段的光纤通信系统只有IM/DD(光强调制/直接探测)方式一种。经过多年的努力,这种方式达到的最高信息速率仅为 $8 \times 10^9$  b/s(比特/秒)。尽管光纤孤子通信<sup>[1]</sup>和光纤相干通信<sup>[2]</sup>有可能把这一指标提高几个量级,但是,这和光纤通信理论上的信息容量仍相差很远,况且这些新的通信方式目前仅仅处于研究阶段,距离实用化还有一段较长的时间。因此,为了充分挖掘和发挥光纤传输信息的潜力,近年来又提出并积极开展复用光纤传输技术的研究。

复用技术是一种能够充分利用传输线的信道容量的通信技术。它是先把来自若干信息源的消息进行合并,然后将这一合成的消息群经由单一共用的传输设备进行传输,并在收端再将这一消息群重新分离复现。因此复用,实质上是多路复用,是一种多通道的工作方式。

在电通信(例如电缆通信、微波通信)中早已使用过所谓信号复用技术,这是一种成熟了的多路复用手段,它可分为两种常见的工作方式,一种叫做频分多路(FDM),另一种叫做时分多路(TDM)<sup>[3]</sup>。其中频分多路复用主要用于模拟信息源,从实质上讲,它是在频率上把多个信息通道“堆积”在一起,以便形成一个合成的信号,然后用这一信号以某种调制方式去调制载波,通过传输在接收端解调后,再借助带通滤波器和各信道的频率选择,将各个消息分离与重现出来。而时分多路复用则主要用于数字信息源,它将若干个原始的脉冲调制信号的窄脉冲在时间上进行交错,从而形成一个合成脉冲,并令其传输,在接收端再借助选择适当脉冲

进入单个信道滤波器的方法完成时间多路脉冲流的分离。显然,这两种多路复用方法在不增加传输设备的情况下,可将通信容量提高若干倍,因此复用通信技术受到广泛重视,并且日益成为一门较成熟的技术。

在光纤通信中,除了设法引进这种较成熟的技术外,近年来,根据光载波的特性又提出一种新颖的复用技术,这就是所谓光波复用技术。光波复用分为两种形式:一种叫波分复用(WDM),一种叫空分复用(SDM)。其中波分复用已成为当今光纤通信研究的重要课题,它引起了光纤科技人员和物理学工作者的广泛兴趣。至于空分复用方面,目前仅限于复用光纤(即光缆)方面的研究和开发,而在光纤复用(严格意义上的空分复用)方面目前还没有提出一种有实用价值的方案,因此有待于进一步研究和开发。

### 一、波分复用光纤通信的基本原理

波分复用(WDM)是指在一根光纤中同时传输具有不同波长的两个或两个以上的光载波,而每个光载波又各自载荷一群数字信号,因此,波分复用又可称为多群复用。图1给出的是波分复用的方框图。具有不同波长、各自载荷有信息信号的若干个载波( $CH_1, CH_2, \dots, CH_n$ )经合波器合成一束光,并被耦合到一根光纤中去,经光纤传输到终端,由分波器将各载波分离,并分别解调,使各自载荷的信号重现( $CH'_1, CH'_2, \dots, CH'_n$ )。同样的过程还可以沿与上述方向相反的方向进行,如图中虚线所

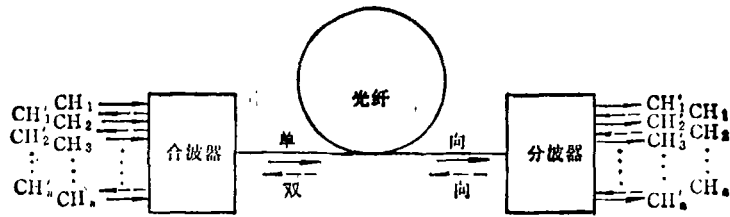


图 1

指。两个方向同时进行的方式称为双向复用，显然，双向方式又可将通信容量提高一倍。

从以上分析可知，光波的波分复用系统实际上是由合波器、传输光纤和分波器组成的，其中合波器与分波器在工作原理上是类同的，故有时统称为复用器。复用器是波分复用光纤通信系统的核心。

### 1. 波分复用器

如上所述，波分复用器起着分波与合波的作用，其基本工作原理是物理光学，如利用介质薄膜的干涉滤光作用，利用棱镜或光栅的色散分光作用等。

#### (1) 干涉滤光片型波分复用器

在介质薄膜光学原理中已经得知<sup>[1]</sup>，具有

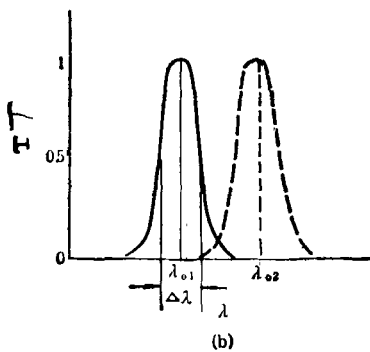
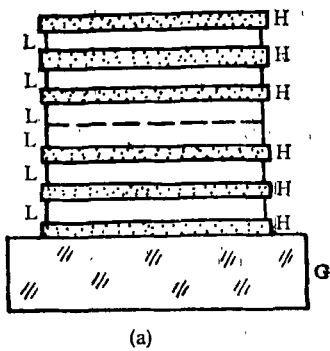


图 2

高折射率  $n_H$  和低折射率  $n_L$  的两种材料（分别以 H, L 表示）交替组成的薄膜系呈现出滤波效应。例如，两组膜系  $(HL)^p$  和  $(LH)^p$  与基底 (G) 组成的  $G(HL)^p \cdot (LH)^p A$  多层介质膜（这里 A 表示空气，p 表示薄膜层数）。若将其改写成  $GH(LH)^{p-1}LL(HL)^{p-1}HA$ ，并参考图 2 (a)，则不难看出， $H(LH)^{p-1}$  与  $(HL)^{p-1}H$  分别构成法布里-珀罗光学标准具的两个高反镜。LL 是这一标准具的间隔层，控制 LL 和 HH 的厚度，使其为波长  $\lambda_0$  的二分之一，于是，波长为  $\lambda_0$  的光波将无损耗地透过间隔层，而偏离  $\lambda_0$  的光波由于不满足  $\lambda_0/2$  条件，因此透过率迅速下降，以致为零，这就形成了一种滤光作用<sup>[1]</sup>。

不过，总的来说，由于干涉滤光片的  $\Delta\lambda$  难以作到很窄，因此复用的路数是有限的。而且要求被分割的两路波长之间不能靠得太近，以防止串扰。这些都是干涉滤光片复用器的缺点。

#### (2) 光栅型波分复用器

光栅是一种等间隔分割光波波阵面的光学装置，它具有显著的角色散作用，因此可用来作分光器件，如图 3(a) 所示。光源 s 发出的光波通过光栅 G，在其后焦面 P 点的光强可以写成如下形式<sup>[5,6]</sup>：

$$I = ca^2 \left( \frac{\sin^2 u}{u^2} \right) \cdot \left( \frac{\sin^2 Nv}{\sin^2 v} \right),$$

其中  $u = (\pi a \sin \theta) / \lambda$ ,  $v = [\pi(a + b) \sin \theta] / \lambda$ 。当  $v = k\pi$  时，得到光强的最大值，或者说在满足下式的  $\theta$  方向上应出现主最大的亮条纹：

$$(a + b) \sin \theta = \pm k\lambda,$$

此式就是著名的光栅方程。  $k = 0, 1, 2, \dots$  为主最大的次级，  $a + b = d$  为光栅常数。如果光源 s 是多波长组成的复合光，则由此式可以

看出,在同一级次里 ( $k=0$  除外),不同的波长  $\lambda$  对应不同的角度  $\theta$ ,也就是说,光栅把复合光按角度分离开来.这种角色散  $d\theta/d\lambda$  的大小可由光栅方程直接计算出来,即

$$\frac{d\theta}{d\lambda} = \frac{k}{(a+b)\cos\theta}$$

显然,为了得到较大的角色散,应选用较高的级次  $k$ .但是,在这种分光作用中,级次越高,所占光能的比例越小,因此,为了把光能集中到某一较高的级次上,以提高分光效率,人们研制出一种定向光栅,或称为闪耀光栅,其结构如图3(b)所示.这时把衍射的中央最大值移到了与光栅法线成  $\alpha$  角的方向上,在该方向上被闪耀分光的波长  $\lambda_B$  可由上述光栅方程求出,即

$$d(\sin\alpha + \sin\alpha) = 2d\sin\alpha = k\lambda_B$$

目前利用这种光栅,并借助优质的工艺可以把入射光的80%功率分光到以  $\lambda_B$  为中心的谱区,或者说,可把  $\lambda_B$  的入射光大部分耦合到以  $\alpha$  角定向的光纤中去.正因为如此,现在研制的光栅型波分复用器均使用这类光栅.

与滤光片型比较,光栅型的最大优点是分波(或合波)的路数多,缺点是插入损耗稍大,工艺也复杂一些.

### (3) 棱镜型波分复用器

我们知道,棱镜和光栅一样,也是一种角色散器件,因此也具有分光能力.棱镜的角色散为

$$\frac{d\theta}{d\lambda} = \frac{2\sin(\alpha/2)}{[1 - n^2\sin^2(\alpha/2)]^{1/2}} \cdot \frac{dn}{d\lambda}$$

其中  $n$  是棱镜介质的折射率,  $dn/d\lambda$  是色散率,  $\alpha$  是棱镜的折射角.可以看出,选择大折射角、高色散率的棱镜可以得到大的角色散,或者

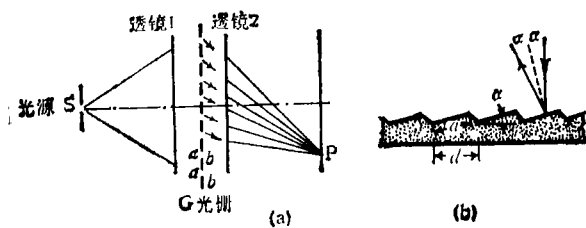


图 3

物理

说,可以实现较多路数的分波(或合波).

由于棱镜型复用器件工艺复杂,制作较难,因此单独使用较少.一般都是将它与其它类型的波分复用器相结合,构成复合型复用器.这里要特别指出,随着波分复用技术的发展,近些年来又先后提出全光型和集成光学型复用器结构<sup>[10,11]</sup>.不过,它们的工作原理仍来源于上述三种基本型复用器.为了比较,我们在表1中列出了目前各种波分复用器所达到的复用路数指标<sup>[9]</sup>.表1中的  $s$ ,  $m$  分别表示使用的单模和多模传输光纤,“单向”和“双向”表示一根光纤的单向传输和双向传输,符号“×”表示这种复用形式目前尚未实现,正在研究之中.

表1 各种波分复用器的复用路数

波分复用器件	单 向				双 向	
	合 波		分 波		合 波	
	$m$	$s$	$m$	$s$	$m$	$s$
棱镜型		×	3			
干涉滤光片型	4	2	6	2	2+2	2+2
光栅型	10	×	20	20		×
滤光加光栅型		×	13			2+2
光纤耦合型	2		2			
集成光学型	2		2			

从原理上讲,合波器与分波器没有本质上的差别,但是,由于二者在系统中所处位置和所起作用的不同,因此在设计上仍有区别.例如,由图1可知,分波器输出与光探测器相接,所以它的输出光纤纤径与数字孔径可以取得大一些,以便降低器件损耗;而对于合波器来说,其输出与传输光纤相接,因此就受到限制,纤径和数字孔径值都不能随意增大.

## 2. 光纤和光源

在波分复用系统中,由于同时传输多个光载波,因此对于传输光纤来说应该具有较宽或较多的传输窗口,即对传输的  $\lambda_1, \lambda_2, \dots$  各波长的光均为低损耗.例如 Hanawa 等人<sup>[12]</sup>报道的一种波分复用光纤,在  $1.0-1.6\mu\text{m}$  波长范围内,损耗均在  $0.46-2\text{dB/km}$  的水平上,在另外一个窗口(即  $0.85\mu\text{m}$  附近)也有较低的损耗指标.因此,如果使用  $0.75\mu\text{m}, 0.81\mu\text{m}, 0.89\mu\text{m}$

的短波长半导体激光器和  $1.2\mu\text{m}$ ,  $1.3\mu\text{m}$ ,  $1.55\mu\text{m}$  的长波长半导体激光器, 借助这种光纤则可实现六波复用的光纤通信。

不难看出, 在波分复用系统中, 对光源的要求是: 输出的频率要稳定, 带宽要窄。如不满足第一个条件, 则会引起通道间的串扰, 降低复用质量; 如不满足第二个条件, 则在光纤的有限窗口内复用的路数就会减少。

在光源方面, 近年来出现了有关研制多波长半导体激光器的成功报道<sup>[13-15]</sup>。由于一个光源同时可输出多个波长, 因此用于光纤通信的复用系统就会使设备大大简化。由于这个原因, 现在人们称这种多波长激光器为有源波分复用器, 而称上述光栅、棱镜、滤光片等形式的器件为无源复用器。图 4 给出了两种有代表性的双波长发光二极管 (LED) 和激光器 (LD) 的结构, 其中图 4(a) 是用液相外延生成各外延层 (均为  $n$  层), 然后用  $\text{SiO}_2$  作掩膜在  $680^\circ\text{C}$  深锌扩散, 去除  $\text{SiO}_2$  膜后, 将阳极氧化, 制成  $20\mu\text{m}$  条宽, 腔长  $200\mu\text{m}$ , P 面朝上, 装在热沉上<sup>[13]</sup>。这种双波长 LD 输出功率大, 串扰低。Nagai 制成的双波长隐埋异性结 (BH) LD 串扰可达  $-50\text{dB}$ <sup>[14]</sup>, 用于双波长复用系统, 可以

$\text{H}_2\text{O}_2 = 1:1:1$  在  $25^\circ\text{C}$  下腐蚀由部分台面制作而成的双波长 LED 结构<sup>[15]</sup>, 输出波长为  $1.03\mu\text{m}$ ,  $1.28\mu\text{m}$ , 功率分别可达  $1\text{mW}$ 。此外还有一些新形式的多波长 LD, LED 不断报道<sup>[9,11]</sup>。使用双波长有源器件研制成的复用通信系统与图 1 所示的装置比较, 在结构上有明显的简化。

## 二、空分复用光纤通信

光纤组合在一起成束或成缆, 可以看作是一种“复合”光纤, 其中每一根光纤传输一路光载波, 多根光纤组合成一束, 如果用来传光, 则称为传光束 (又称非相干纤维束); 如果用来传象, 则称为传象束 (又称相干纤维束); 如果用来通信, 则称为光缆。例如将 12 根光纤封装成带状体, 然后再将这种带状体组合成方形芯, 周围加装护套成缆。这样, 即可同时传输  $12 \times 12 = 144$  路光载波。如上所述, “复用”是指单根光纤而言, 因此, 空分复用应该是对单根光纤中传输的光波进行空间分割的复用。这种复用方式能否实现呢? 目前还未作出确切回答。作者认为, 这可能是由于光纤中传输的光束很“细” (甚至接近波长量级) 以及波前相位在传输中的随机涨落等因素, 从而使得空间分割极为困难。因此到目前为止, 还未曾见过这方面成功的实验报道。最近, “调制光波相干度与解调”概念的提出<sup>[17]</sup>, 可能为研制确切的空分复用提供一个线索。目前, 由于二维相干度调制的理论与实验已经作出<sup>[18]</sup>, 因此, 应该说两路空分复用通信的实验条件已趋于成熟, 当然在实践中还会遇到很多问题。目前这种通信方式已采用一维实验装置, 完成了近距离的光纤通信实验<sup>[19]</sup>, 只要把调制器改成二维或多维的<sup>[18]</sup>, 空分复用实验即可进行。

光波复用光纤通信是当今光通信领域中重要的发展方向之一, 因此引起了世界各国的广泛重视。目前已从实验室的器件研究和小系统研究, 逐渐进入大系统的实用化研究。最早的实用化实验是在 1980 年进行的<sup>[9]</sup>, 实验线路长

(下转第 602 页)

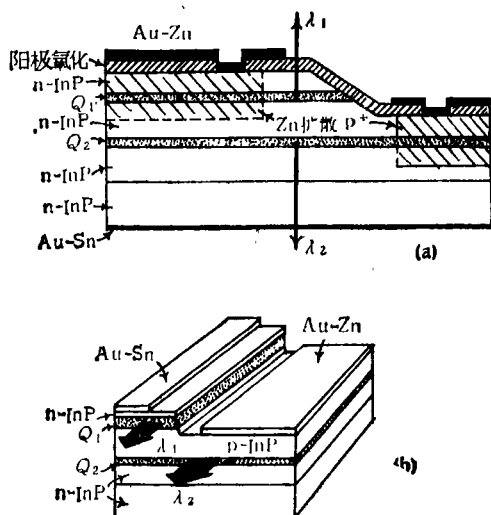


图 4

说是一种理想的复用器。图 4(b) 是用液相外延生成各外延层, 然后用  $\text{HCl}:\text{CH}_3\text{COOH}$ :