

光纤通信中的无源器件

内容提要：

- 光纤连接与耦合
- 光损耗器
- 光纤光栅与光滤波器
- WDM 合波器/分波器
- 光隔离器与光开关

在光纤通信系统中,除了光源和光检测器等有源光器件之外,还有一些不需要电源的光器件,统称为无源光器件,如光纤连接器、光纤耦合器、光纤光栅、光滤波器、光开关以及 WDM 合波器/分波器等。对于未来先进的光纤通信系统,无源器件的使用将会越来越多。

3.1 光纤的连接与耦合

3.1.1 光纤连接器

光纤连接器俗称“活接头”,ITU-T 建议将其定义为“用以稳定地,但不是永久地连接两根或多根光纤的无源组件”,主要用于光源尾纤输出或光检测器尾纤输入与传输光纤之间的连接。光纤线路中的光纤与光纤之间的接头是永久性固定连接。

连接器是光纤通信系统中应用最广泛的一种无源器件。光纤连接器的使用必定会引入一定的插入损耗而影响传输性能。对光纤连接器的一般要求是插入损耗小、重复插拔的寿命长、互换性好、拆卸方便等。

1. 光纤连接损耗

光纤连接损耗可分为外部损耗和内部损耗。外部损耗是由于光纤之间的连接错位引起的损耗。内部损耗是由于光纤的波导特性和几何特性差异导致的损耗。

连接错位一般有以下几种情况:轴向位移、间隔、倾斜错位、截面不平整,如图 3.1 所示。

轴向位移即两根光纤连接处有轴向错位,其耦合损耗在零点几分贝到几个分贝之间。若错位距离小于光纤直径的 5%,则损耗一般可以忽略不计。

对于倾斜错位,若角度小于 2° ,则耦合损耗不会超过 0.5dB。

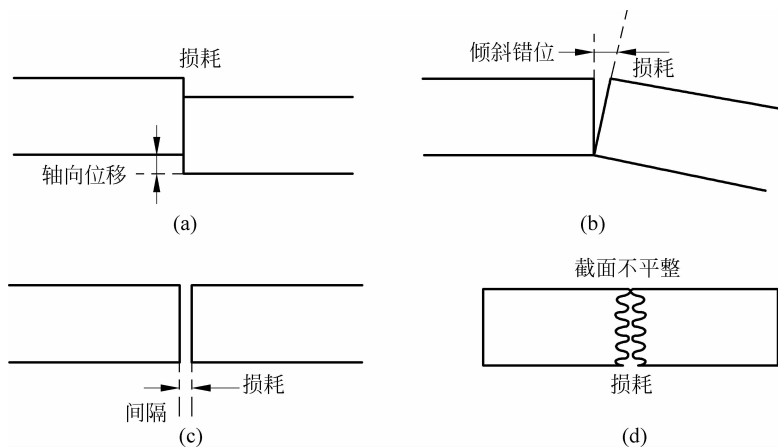


图 3.1 光纤错位连接损耗

如果两根光纤直接对接,则必须接触在一起,光纤分得越开,光的损耗越大。如果两根光纤通过连接器相连,则不必接触,因为在连接器产生的相互摩擦会损坏光纤。

对于截面不平整,光纤连接的两个截面必须经过高精度抛光和正面黏合,如果截面与垂直面的夹角小于 3° ,则耦合损耗不会超过 0.5dB。

除了错位连接之外,任何相连的光纤的几何特性和波导特性的差异对光纤间的耦合损耗都有大的影响。这些特性包括纤芯的直径、纤芯区域的椭圆度、光纤的数值孔径、折射率剖面等。由于这些参数与生产厂家有关,因而使用者不能控制特性的变化。在这些参数中,纤芯直径和数值孔径的差异对连接损耗的影响更大。图 3.2 给出了由纤芯直径、模场直径和数值孔径失配所引起的损耗的示意图。

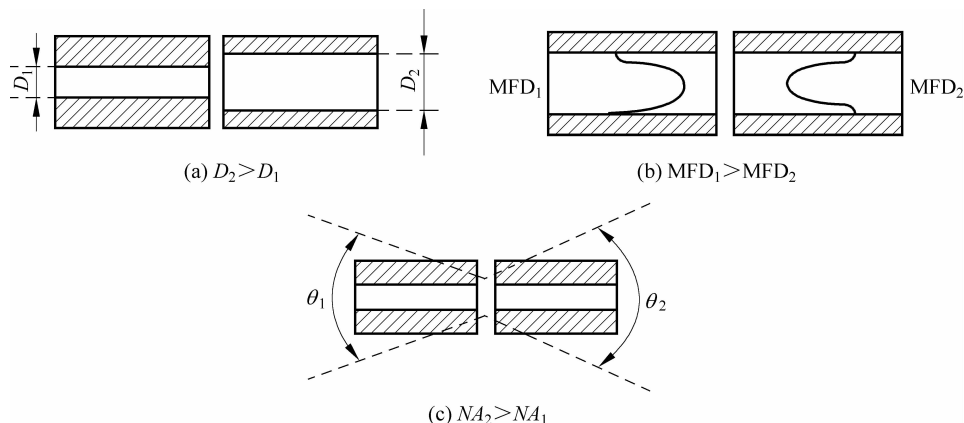


图 3.2 内部连接损耗

2. 光纤连接器的结构

光纤连接器的种类很多,按结构可以分为调心型和非调心型;按连接方式可分为对接耦合式和透镜耦合式;按光纤相互间的接触关系可以分为平面接触式和球面接触式等。其中,使用最多的是非调心型对接耦合式光纤连接器,如平面对接式(FC)型光纤连

接器、直接接触式(PC)型光纤连接器。

(1) 平面对接式(FC)型光纤连接器

FC 型光纤连接器如图 3.3 所示。连接器主要由带有微孔的插针体 a、插针体 b 与用于对中的套筒等几部分构成。插针体 a 装有发射光纤,插针体 b 装有接收光纤。将插针体 a 和 b 同时插入套筒,再将螺旋拧紧,就可完成光纤的对接耦合。两端插针体相互对接,其对接面抛磨成平面。外套有一个弹簧对中套筒,使其压紧并精确对中定位。

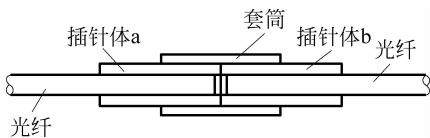


图 3.3 FC 型光纤连接器

套筒和插针通常采用坚硬耐久的金属材料或陶瓷制成。

(2) 直接接触式(PC)型光纤连接器

FC 型连接器所连接的两条光纤处于平面接触状态,端面间难免会有很小的空气间隙,在光纤和空气中产生菲涅尔反射,其反射光会引起额外的损耗、噪声和波形失真。PC 型光纤连接器把插针体端面抛磨成凸球面,使连接的两条光纤的端面直接接触,实现 PC(物理接触)结构。PC 型光纤连接器的插入损耗小,反射损耗大,性能稳定,特别适用于高速光纤通信。

(3) 矩形(SC)型光纤连接器

FC 和 PC 光纤连接器一般都是螺旋耦合型或卡口耦合型,在安装时需要留有一定的空间,以便耦合部分的旋转,这样就不能满足在光纤用户网中高密度安装的要求。在光纤用户网中使用一种 SC 型光纤连接器,如图 3.4 所示。SC 型光纤连接器体积小,插拔时只需轴向操作,无须旋转。

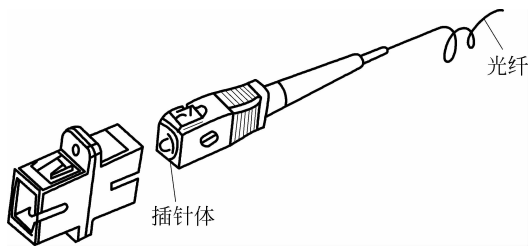


图 3.4 SC 型光纤连接器

3. 光纤连接器的性能

光纤连接器的性能主要由以下参数衡量。

(1) 插入损耗(介入损耗),即连接损耗,因连接器的导入而引起的链路有效光功率的损耗。该值越小越好,平均损耗值应不大于 0.5dB。

(2) 回波损耗(或称反射损耗、回损、回程损耗),是衡量从连接器反射回来并沿输入通道返回的输入功率分量的一个度量值。该值越大越好,其典型值应不小于 25dB。

(3) 互换性,光纤连接器是通用的,可任意组合使用。每次互换后,其连接损耗变化量越小越好。

(4) 重复性,即每次插拔时连接损耗变化量要小。

(5) 插拔寿命(最大可插拔次数),光纤连接器的插拔寿命通常由元件的机械磨损情况决定。一般的光纤连接器都可以插拔 1000 次以上。

光纤连接器的一般性能如表 3.1 所示。

表 3.1 光纤连接器的一般性能

指 标	型号或材料	性 能
插入损耗/dB		0.2~0.3
重复性/dB		$<\pm 0.1$
互换性/dB		$<\pm 0.1$
反射损耗/dB	FC 型	35~40
	PC 型	45~50
寿命(插拔次数)	不锈钢	10^3
	陶瓷	10^4
使用温度范围/°C	不锈钢	-20~+70
	陶瓷	-40~+80

3.1.2 接头

接头是把两个光纤端面结合在一起,以实现光纤与光纤之间的永久性(固定)连接。接头用于相邻两根光缆(纤)之间的连接,以形成长距离光缆线路。

对接头的要求是连接损耗小,有足够的机械强度以及长期的可靠性和稳定性,价格要便宜。这里介绍光纤通信中常用的连接方法。

1. 热熔连接

把端面切割良好的两根光纤放在 V 形槽内,用微调器使纤芯精确对中,用高压电弧加热把两个光纤端面熔合在一起,用热塑套管加固形成接头,如图 3.5 所示。这种技术产生非常小的连接损耗(单模或多模光纤接头平均连接损耗 0.05~0.07dB)。热熔连接方法在世界范围得到广泛应用,市场上有多种规格的自动熔接机,使用方便。

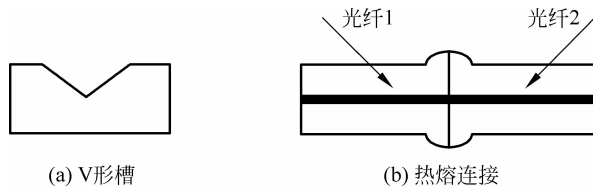


图 3.5 光纤的热熔连接

2. 机械连接

机械连接是指用 V 形槽、准制棒或弹性夹头等机械夹具,使两根端面良好的光纤保持外表面准直,用热固化或紫外固化,并用光学兼容环氧树脂黏结加固。这种连接方法的连接损耗较大(平均连接损耗为 0.11~0.13dB),因为纤芯对中的程度完全取决于光纤外径的公差和机械夹具对光纤的控制能力。

3. 毛细管黏结连接

毛细管黏结连接是指把光纤插入精制的玻璃毛细管中,用紫外固化黏结剂固定,对端面进行抛光;在支架上用压缩弹簧把毛细管挤压在一起;调节光纤位置,使输出功率达到最大,从而实现对中,用光学兼容环氧树脂黏结形成接头。这种连接方法的接头损耗很低(单模光纤的平均连接损耗为 $0.03 \sim 0.04\text{dB}$)。

3.1.3 光纤耦合器

光耦合器是分路和耦合光信号的器件,其功能是把一个输入的光信号分配给多个输出(分路),或把多个输入的光信号组合成一个输出(耦合)。光耦合器按制作方法分为微镜片耦合器、波导耦合器和光纤耦合器等。其中,光纤耦合器由于制作时只需要光纤,不需要其他光学元件,具有与传输光纤容易连接且损耗较低,耦合过程无须离开光纤,不存在任何反射端面引起的回波损耗等优点,更适合光纤通信。

1. 耦合器类型

图 3.6 所示为常用耦合器的类型,它们有不同的功能和用途。

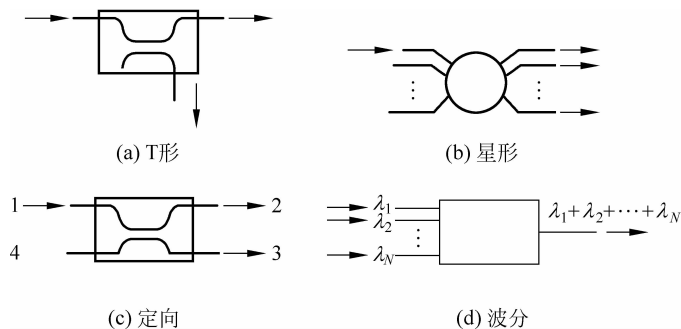


图 3.6 常用耦合器类型

(1) T形耦合器: 这是一种 2×2 的 3 端耦合器,如图 3.6(a)所示,其功能是把一根光纤输入的光信号按一定比例分配给两根光纤;或把两根光纤输入的光信号组合在一起,输入一根光纤。这种耦合器主要用做不同分路比的功率分配器或功率组合器。

(2) 星形耦合器: 这是一种 $n \times m$ 耦合器,如图 3.6(b)所示,其功能是把 n 根光纤输入的光功率组合在一起,均匀地分配给 m 根光纤, m 和 n 不一定相等。这种耦合器通常用做多端功率分配器。

(3) 定向耦合器: 这是一种 2×2 的 3 端或 4 端耦合器,其功能是分别取出光纤中向不同方向传输的光信号,如图 3.6(c)所示,光信号从端 1 传输到端 2,一部分由端 3 输出,端 4 无输出;光信号从端 2 传输到端 1,一部分由端 4 输出,端 3 无输出。定向耦合器可用做分路器,不能用做合路器。

(4) 波分复用器/解复用器(也称合波器/分波器): 这是一种与波长有关的耦合器,如图 3.6(d)所示。波分复用器的功能是把多个不同波长的发射机输出的光信号组合在

一起输入到一根光纤,解复用器是把一根光纤输出的多个不同波长的光信号分配给不同的接收机。波分复用器/解复用器将在 3.5 节详细介绍。

2. 主要性能指标

表明光纤耦合器性能的主要参数有插入损耗、附加损耗、分光比或耦合比、隔离度等。下面以 2×2 定向耦合器为例来说明,如图 3.6(c)所示。

(1) 插入损耗 L_i

插入损耗是指定输入端口的输入光功率 P_i 和指定输出端口的输出功率 P_o 的比值,用分贝(dB)表示,即

$$L_i = 10 \lg \frac{P_i}{P_o} \quad (3.1)$$

一个耦合器的插入损耗是相当高的。 2×2 耦合器的插入损耗的典型值为 3.4dB。

(2) 附加损耗 L_e

附加损耗是由散射、吸收和器件缺陷产生的损耗,是全部输入端口的光功率总和 P_{it} 和全部输出端的光功率总和 P_{ot} 的比值,用分贝(dB)表示,即

$$L_e = 10 \lg \frac{P_{it}}{P_{ot}} \quad (3.2)$$

在理想状态下,输出功率之和应该等于输入功率。附加损耗定量给出了实际情况和理想状态的差别,因此附加损耗应尽可能小。耦合器的附加损耗值依赖于其类型。典型附加损耗在 0.06~0.15dB 之间变化。

(3) 耦合比 CR

耦合比是指一个指定输出端口(2 或 3)的输出光功率与全部输出端口(2 和 3)的输出光功率总和的比值,用分贝(dB)表示,即

$$CR = -10 \lg \frac{P_{o2}}{P_{o2} + P_{o3}} \quad (3.3)$$

(4) 隔离度 A

隔离度是指一个输入端口(1)的输入光功率 P_i 与由耦合器泄漏到其他输入端口(4)的光功率 P_l 的比值,用分贝(dB)表示,即

$$A_{i,l} = 10 \lg \frac{P_i}{P_l} \quad (3.4)$$

一般情况下,要求 $A > 20\text{dB}$ 。

3.2 光损耗器

光损耗器是用来稳定、准确地减小信号光功率的无源光器件。光损耗器主要用于调整中继段的线路衰减,测量光系统的灵敏度及校正光功率计等。

光损耗器分固定损耗器和可变损耗器两种。固定损耗器造成的功率损耗值是固定不变的,主要用于调节传输线路的光损耗。因为在光接收端,如果光功率过大,可能会烧

坏光电检测器件,或使其饱和。在光接收机的接收端用固定损耗器给出一定的衰减量,以确保接收光功率大小在合适的范围内。可变损耗器造成的功率损耗值可在一定范围内调节,分为连续可变和分挡可变两种。可变损耗器主要用于调节光线路电平,在测量光接收机灵敏度时,需要用可变光损耗器来连续调节、观察接收机的误码率,在校正光功率计时也需要光可变损耗器。

光损耗器的结构示意图如图 3.7 所示。光纤输入的光经自聚焦透镜变成平行光束,平行光束经过衰减片再送到自聚焦透镜耦合到输出光纤中去。衰减片通常是表面镀了金属吸收膜的玻璃基片,为减少反射光,衰减片与光轴可以倾斜放置。

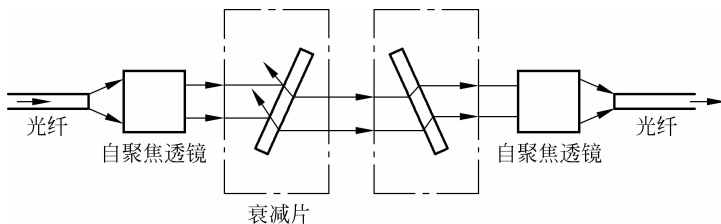


图 3.7 光损耗器的结构示意图

3.3 光纤光栅

光纤光栅是近几年发展最迅速的一种光纤无源器件。它是利用光纤中的光敏性制成的。光敏性是指当外界入射的紫外光照射到纤芯中掺铒的光纤时,光纤的折射率将随光强而发生永久性改变(强度高的地方纤芯折射率增加,强度低的地方纤芯折射率几乎无任何变化)。即利用高强度紫外光源所形成的干涉条纹,在几厘米(如光纤布喇格光栅的有效长度为 3.5cm)之内对光纤进行侧面横向曝光,在该光纤芯中产生折射率调制或相位光栅,从而形成了光纤光栅。

紫外线的波长范围为 $6 \times 10^{-3} \sim 0.39 \mu\text{m}$,当掺铒的石英光纤受到峰值波长为 240nm 的紫外光呈空间周期性照射时,纤芯中的折射率呈现周期性变化,形成光栅(FG)。

光纤光栅最显著的优点是插入损耗低,结构简单,便于与光纤耦合,而且它具有高波长选择性。因此,近几年它在光纤通信及应变传感领域中得到广泛的应用。

如果光注入光栅 FG 后,与折射率变化周期相对应的特定波长的光能够被逆向反射回去,则称具有这种功能的光栅为光纤布喇格光栅。

光纤光栅在纤芯上的折射率呈周期性变化,如果光栅间距(重复周期)为半波长的整数倍,则在每个折射率周期变化处反射回来的光同相叠加。当各个周期的反射光束全都彼此同相叠加时,光栅的作用就如同反射镜一样。反射波长服从布喇格定律,即

$$\Lambda = m \frac{\lambda}{2} \quad (3.5)$$

式中, Λ 是光栅间距; λ 是纤芯中测得的波长; m 是布喇格反射级数。

波长不满足布喇格定律的光不受光栅的影响,将通过光栅继续传播,所以光纤布喇

格光栅基本作为滤波器使用。

光纤布喇格光栅结构如图 3.8 所示。紫外干涉光从掺锗光纤侧面照射, Λ 称为布喇格间距, 改变间距可以调谐光栅的谐振波长, 可以用机械或加热的方法来实现。机械方法是指拉伸或压缩光纤, 热调谐方法是靠改变光纤的温度来实现的, 这种效应是应力或温度光纤传感器和可调谐滤波器的理论基础。

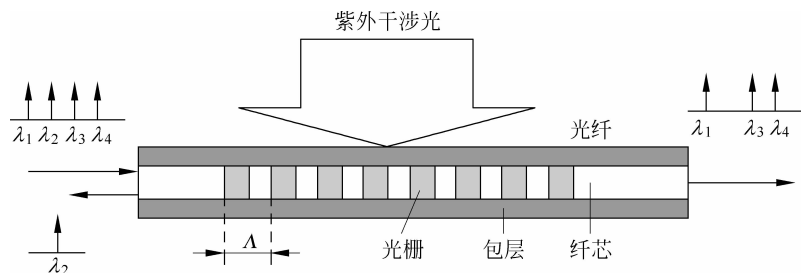


图 3.8 光纤布喇格光栅

光纤布喇格光栅应用于许多领域, 主要包括在 WDM 系统中作为滤波器; 在半导体激光器中用于稳定发射波长; 作为组合光纤传感器, 用于测量应力和温度; 用于色散补偿; 在掺铒光纤放大器中用于稳定和均衡增益; 作为固定或可调谐滤波器。

3.4 光滤波器

在光纤通信系统中, 只允许一定波长的光信号通过的器件称为光滤波器。如果所通过的光波长可以改变, 称之为波长可调谐光滤波器。由于可调谐滤波器需要一些外部电源, 严格地说它不是无源器件。

3.4.1 法布里—珀罗滤波器

目前, 结构最简单、应用最广泛的光滤波器是法布里—珀罗腔(F-P 腔)光滤波器。

F-P 腔型光滤波器的主体是 F-P 谐振腔, 其结构如图 3.9 所示。它由一对具有高反射率平行放置的镜面 M_1 和 M_2 构成, 两个镜面之间的距离为腔长 L , λ_g 为谐振腔介质中光波的波长, 两个镜面之间介质的折射指数为 n 。输入光垂直入射到镜面 M_1 , 透过镜面 M_2 向右方输出。

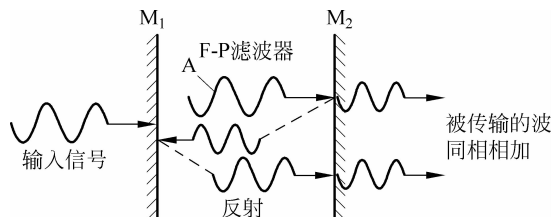


图 3.9 F-P 腔型光滤波器

对于平行平面腔而言,由于腔的尺寸远大于工作波长,因此腔内的电磁波可认为是均匀平面波,而且在腔内往返运动时,是垂直于反射镜面投射的。如图 3.9 所示,从 A 点出发的平面波垂直投射到反射镜 M_2 ,由 M_2 反射后又垂直投射到反射镜 M_1 ,再回到 A 点时,在该点的波形为两列波的叠加。如果光波能量之间的相位差正好是 2π 的整数倍,显然就达到了谐振。

按照上述相位差满足 2π 整数倍关系,应有

$$L = \frac{\lambda_g}{2} \cdot q, \quad q = 1, 2, 3, \dots \quad (3.6)$$

式(3.6)表明,光波在谐振腔中往返一次,光的距离($2L$)恰好为 λ_g 的整数倍,即相位差是 2π 的整数倍。得出光波长的表示式为

$$\lambda_g = \frac{2L}{q} \quad (3.7)$$

式(3.7)即为光学谐振腔的谐振条件。满足此条件的入射光波可形成稳定振荡,输出光波之间会产生多光束干涉,最后输出等间隔的梳状波形。

在光学谐振腔内,工作物质的折射指数为 n ,则由式(3.7)可以得出折算到真空的光学谐振腔的谐振波长为

$$\lambda_{og} = n\lambda_g = \frac{2nL}{q} \quad (3.8)$$

可以看出,改变腔长 L 或腔内的折射率 n ,就能调谐滤波波长。

光纤法布里—珀罗滤波器如图 3.10 所示,光纤端面本身就充当两块平行的镜面。在电信号的驱动下,压电陶瓷可进行伸缩,造成空气间隙的变化,引起腔长的改变,从而实现波长的调谐。这种结构可实现小型化。

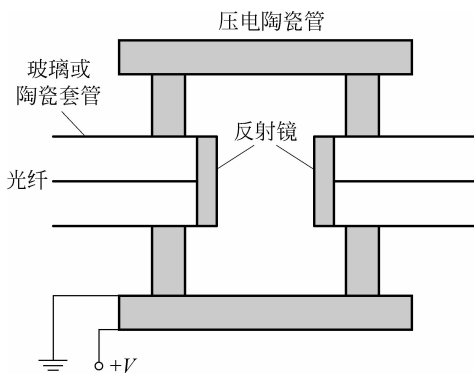


图 3.10 光纤 F-P 滤波器

3.4.2 马赫—曾德尔滤波器

图 3.11 所示是马赫—曾德尔(Mach-Zender)干涉滤波器,它由两个 3dB 耦合器串联组成一个马赫—曾德尔干涉仪,干涉仪的两臂长度不等,光程差为 ΔL 。

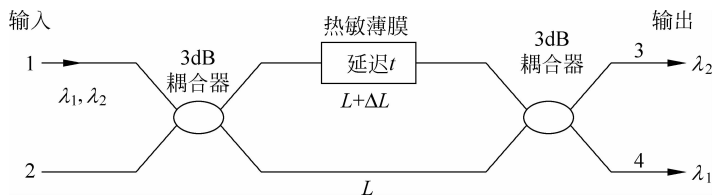


图 3.11 马赫—曾德尔干涉滤波器

马赫—曾德尔干涉滤波器的原理是基于两个相干单色光经过不同的光程传输后的干涉理论。考虑两个波长 λ_1 和 λ_2 复用后的光信号由光纤送入马赫—曾德尔干涉滤波器的输入端 1, 两个波长的光功率经第一个 3dB 耦合器均匀地分配到干涉仪的两臂上, 由于两臂的长度差为 ΔL , 所以经两臂传输后的光在到达第二个 3dB 耦合器时产生相位差 $\Delta\varphi=2\pi f(\Delta L)n/c$, 式中 n 是折射率。复合后, 每个波长的信号光在满足一定的相位条件下, 在两条输出光纤中的一个相长干涉, 在另一条相消干涉。如果在输出端口 3, λ_2 满足相长条件, λ_1 满足相消条件, 则输出 λ_2 光; 如果在输出端口 4, λ_2 满足相消条件, λ_1 满足相长条件, 则输出 λ_1 光。

3.5 WDM 合波器/分波器

WDM 合波器/分波器又称为波分复用器/解复用器, 是波分复用系统的关键部件。光合波器用于传输系统发送端, 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个输出端口输出。光分波器用于传输系统接收端, 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, 将不同波长的光信号分离开来。

根据制造的特点, WDM 器件大致有多层介质薄膜、熔锥光纤型和光栅型等几种类型。下面将简单介绍几种常用器件。

3.5.1 多层介质薄膜

薄膜谐振腔滤波器也是一个 F-P 干涉仪, 只不过其反射镜是采用多层介质薄膜而已, 常称为多层介质薄膜滤波器 (Multilayer Dielectric Thin Film Filter, MDTFF)。这种滤波器用做带通滤波器, 只允许特定波长的光通过, 而让其他所有波长的光反射, 腔的长度决定要通过的波长。

多层介质薄膜 MDTFF 的结构如图 3.12 所示。如果每层的厚度是 $\lambda/4$, 那么, 当入射角等于零即垂直入射时, 波长为 λ 的光在通过每层后得到相位位移 π 。因此, 反射波与入射波相位相反, 它们将形成相消性干涉, 也就是相互抵消。也就是说, 波长为 λ 的光将不被反射, 这意味着这个光通过, 所有其他的光将被反射, 这就是滤波。如果每层厚度等于 $\lambda/2$, 那么反射波将成相长干涉, 也就是它们和入射波将同相位并相互相加, 使它变成了一个高反射镜。

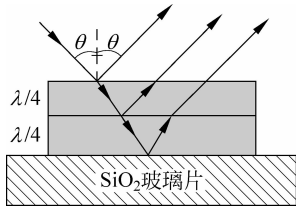


图 3.12 多层介质薄膜 MDTFF 的结构

利用这种特性, 在基底 G 上镀多层介质膜, 多层结构增强了效果, 使滤波特性接近理想状态。这个技术在光学中已应用多年, 最流行的应用是在相机、眼镜和类似的光学仪器中的防反射涂层 AR。

多个 MDTFF 级联后,就可以做成波分复用器,如图 3.13 所示。利用楔状玻璃镀 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4$ 和 λ_5 滤光膜,当波长为 $\lambda_1 \sim \lambda_5$ 的光从同一根光纤输入时,首先 λ_1 通过滤波器输出,其余被反射,继而 λ_2 通过滤波器输出,以此类推,达到解复用的目的。在这种结构中,棒透镜主要构成平行光路的作用;如改变传输方向,则起波长分割复用的作用。

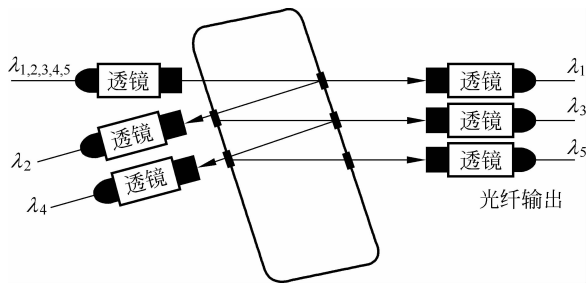


图 3.13 MDTFF 复用器

MDTFF 复用器在温度变化时性能稳定,插入损耗较小(1~2dB),对光的偏振不敏感,被广泛应用在商业系统中。

3.5.2 熔拉双锥型

熔拉双锥(熔锥)型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,使其熔融在一起。由于不同光纤的纤芯十分靠近,因而可以通过锥形区的消逝波耦合达到所需要的耦合功率。

图 3.14 所示为在掺铒光纤放大器(EDFA)用波分复用器中,980nm 泵浦光和 1550nm 信号光的耦合过程。

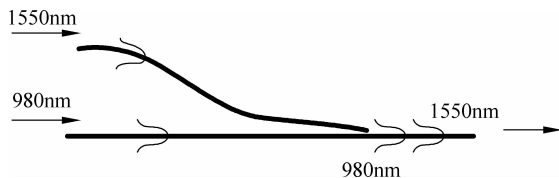


图 3.14 掺铒光纤放大器(EDFA)用波分复用器

用熔拉双锥光纤耦合器构成的复用器很有吸引力,因为它比较简单,但这种复用器适合于信道间隔相当大($>10\text{nm}$)的系统,对密集波分复用系统就不合适了。

3.5.3 光纤光栅型

光纤光栅可以被用做密集波分复用系统的解复用器,如图 3.15 所示。它由在光纤马赫—曾德尔干涉仪的两个干涉臂上具有完全相同的布喇格光纤光栅组成。经波分复用后,若干个波长的信息流(假设为 $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_7$)从端口 1 输入。若光栅的共振波长为