

构建一个完整的光纤通信系统,除了要采用光纤光缆、光发送机和光接收机外,还需要许多配套的功能部件以实现系统各组件间信道的互通、分路/合路、复用/解复用、光路转换、波长/频率选择、功率控制、噪声滤除、反向隔离、偏振选择控制等功能,这些功能部件统称为无源光器件,以区别激光器、光电探测器、光放大器等有源光器件。无源光器件的主要特点是不与光信号直接交换能量,但可以对光信号实施空间域、时间域或相位频率域的控制和处理。无源光器件种类繁多,主要有光纤连接器、光耦合器、光滤波器、光调制器、波分复用/解复用器、光开关、光隔离器和光环形器等。本章主要介绍光纤通信用无源光器件的结构、工作原理、基本特性及其应用。

3.1 光纤连接器

实际应用的光纤系统都是由许多根光纤连接构成,而光纤间的连接需要采用精心设计的光纤连接技术,使得发送光纤输出的光能量最大限度地耦合到接收光纤,降低由光纤连接引起的损耗。光纤连接技术包含光纤端面制备、光纤对准调节与光纤接头固定3个基本环节。

光纤的连接方法主要有光纤端面对接和透镜扩束连接两种。光纤端面对接又分为光纤固定接续和光纤活动连接,前者是永久性连接,称为光纤接头;后者的连接可拆卸,可以用来反复地连接或断开光纤,称为光纤活动连接器,是用来稳定但并不永久性地连接两根或多根光纤的无源组件。



材料

3.1.1 光纤连接器的基本构成

光纤连接器一般采用精密小孔插芯(插针)和套管来实现光纤的精确连接。如图3-1所示,利用环氧树脂热固化剂将光纤黏固在光纤插芯孔内,通过适配器套管定位,实现光纤的对接。

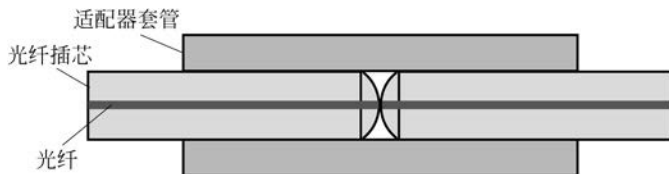


图 3-1 光纤连接器精密对中原理

光纤插芯的制作材料有陶瓷、金属和塑料 3 种,其中陶瓷插芯是市场上(尤其是中国市场)的主流品种,其主要材质是氧化锆,具有热稳定性好、硬度高、熔点高、耐磨和加工精度高等特点。套管是连接器的另一个重要部件,起对准的作用,以便于连接器的安装固定。陶瓷套管的内径比插芯的外径稍小,开缝的套筒箍紧两个插芯,实现精密对准。为了让两根光纤的端面能够更好地接触,光纤插芯端面通常被研磨成不同结构,如图 3-2 所示。

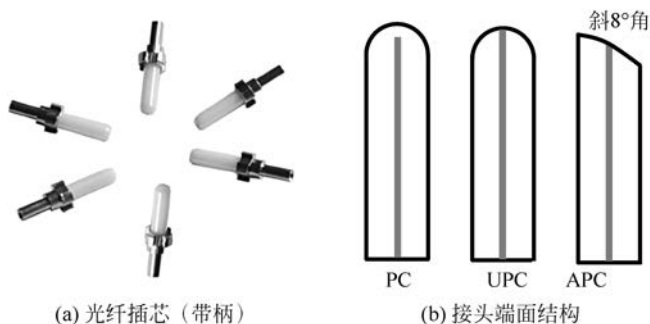


图 3-2 光纤插芯及其接头端面结构

PC 是微球面研磨抛光,插芯表面研磨成圆弧状(曲率半径为 $10\sim 25\text{mm}$),光纤纤芯位于弯曲最高点,这样两个光纤端面达到物理接触(Physical Contact),纤芯端面接触间隙小于 $\lambda/4$,使得菲涅耳反射损耗大为降低。APC(Angled Physical Contact)称为斜面物理接触,光纤端面为精细抛光斜面,其倾斜角(8°)大于普通单模光纤的收光角,这样可增大回波损耗。UPC(Ultra Physical Contact)为超物理端面,是在 PC 的基础上更加优化了端面抛光和表面光洁度,端面的球面曲率半径更小($5\sim 15\text{mm}$),因而回波损耗较 PC 型更大。

3.1.2 常用光纤连接器介绍

光纤活动连接器结构上的差异体现在固定光纤并使之对准的方式以及连接器的锁定装备上。根据接头与光纤适配器(法兰)之间的连接形式的不同,常见的光纤连接器有 FC 型、ST 型、SC 型、LC 型和 MPO 型等。

光纤连接器通常以连接类型和端面接触方式组合命名,如 FC/PC、FC/APC、SC/PC、SC/APC、ST/PC、MPO/APC 等。

1. FC 光纤连接器

FC 连接器(Ferrule Connector)如图 3-3 所示,其外部加强部件为金属套,紧扣方式采用螺丝扣,旋转锁紧,因此常称为“螺口”。这种光纤连接器结构简单,操作方便,制作容易,耐用,可用于高振动环境,多用在光纤终端盒或光纤配线架上。



图 3-3 FC 光纤连接器

2. ST 光纤连接器

ST(Stab & Twist)光纤连接器如图 3-4 所示,外壳成圆形,采用弹簧带键的卡口结构,旋转半周卡口锁紧,是一种卡扣式连接器,常用于光纤配线架。



图 3-4 ST 光纤连接器

3. SC 光纤连接器

SC 光纤连接器(Square Connector or Standard Connector)如图 3-5 所示,其接头是卡接式标准方形接头(常称为“方口”),外壳采用模塑工艺用铸模玻璃纤维塑料制造,紧固方式是采用插拔销闩式,直接插拔,不需要旋转,价格低廉,操作方便,能满足高密度安装的要求,在路由器交换机上使用最多。SC 可设计成一头双纤收发一体的形式,即收发一体的方形光纤连接器(MT-RJ),可用于 GBIC(Giga Bitrate Interface Converter)光模块的连接。



图 3-5 SC 光纤连接器

4. LC 光纤连接器

LC 光纤连接器(Lucent Connector)如图 3-6 所示,它采用操作方便的模块化插孔(RJ)闩锁机制,其插针和套筒尺寸是普通 SC、FC 连接器的一半,其插芯直径为 1.25mm。LC 光纤连接器是为了满足客户对连接器小型化、高密度连接的使用要求而开发的一种新型连接器,它占有的空间只相当于传统 ST 和 SC 连接器的一半,从而可提高光纤配线架中光纤连接器的密度。一头双纤收发一体的 LC 光纤连接器可用于 SFP(Small Form-factor Pluggable)光模块的连接。



图 3-6 LC 光纤连接器

5. MPO 光纤连接器

MPO(Multi-fiber Push On,多纤推拉式)光纤连接器是一种多芯多通道插拔式连接器。MPO 光纤连接器的特征是由一个标称尺寸为 $6.4\text{mm} \times 2.5\text{mm}$ 的矩形插芯(MT 插芯),利用插芯端面上左右两个直径为 0.7mm 的导引针与导引孔进行定位对中。如图 3-7 所示,

MT 插芯具有两个导引孔(针)和若干光纤孔,导引孔(针)和光纤孔的节距分别为 4.6mm 和 0.25mm。对于 8 芯或 12 芯 MPO 光纤连接器,光纤在插芯端面上排成一行,若要把连接器的芯数提高到 12 芯以上,则需要光纤排成两行或两行以上的 2-D 阵列插芯。

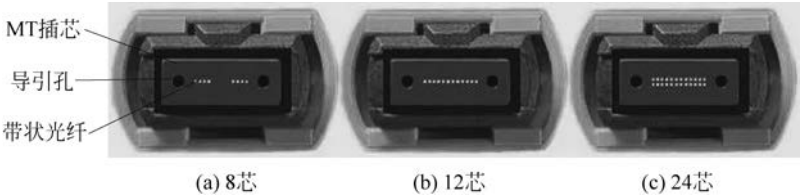


图 3-7 MT 插芯

根据 IEC 61754-7 的规定,MPO 光纤连接器类型由芯数(光纤阵列数 Array Number)、公母头(Male-Female)、极性(Key)和光纤端面抛光类型(PC 或 APC)这几个要素来区分。图 3-8 为 MPO 连接器结构示意图。MPO 连接必须为同芯数连接器连接(12 芯连 12 芯,24 芯连 24 芯等),一个公头(Male)和一个母头(Female)为一对连接,而且必须为同一种抛光类型连接(PC 和 PC,APC 和 APC)。



图 3-8 MPO 光纤连接器插头

MPO 连接器的极性通过 Key 来管理,有向上(Key Up)和向下(Key Down)两种 Key 定义,分别对应图 3-8 中的凸键和凹键。一对 MPO 连接器通过一个 MPO 适配器来匹配,如图 3-9 所示。MPO 适配器有 A 类和 B 类两种类型,A 类定义为向上-向下(Key Up/Key

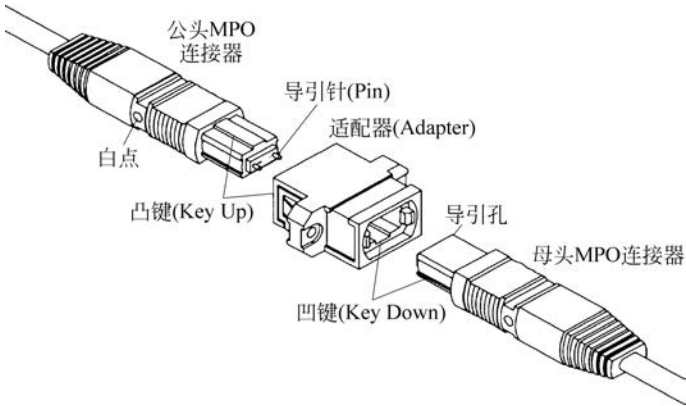


图 3-9 MPO 连接

Down), B 类定义为向上-向上(Key Up/Key Up)。通过选用 A 类或 B 类适配器即可管理光纤极性。采用 APC 连接面的 MPO 连接器(单模)存在 8° 的斜面, 只能通过 A 类适配器来对接。

MPO 高密度光纤预连接系统目前主要用于三大领域, 即数据中心高密度环境下应用, 光纤到大楼中应用, 在分光器、40G/100G QSFP+ 等光收发设备内部的连接应用。

3.2 光耦合器

光耦合器是实现光信号分路/合路的功能器件, 一般是指对同一波长的光功率进行分路或合路(光分路器, Splitter), 也可以是对不同波长光信号的分波或合波(波长选择耦合器)。在光波系统中, 其使用量仅次于光纤连接器。

按端口布排不同, 光耦合器可以分为 Y 形(1×2)耦合器、X 形(2×2)耦合器、树状耦合器($1 \times N, N > 2$)和星状($N \times N, N > 2$)耦合器, 如图 3-10 所示。

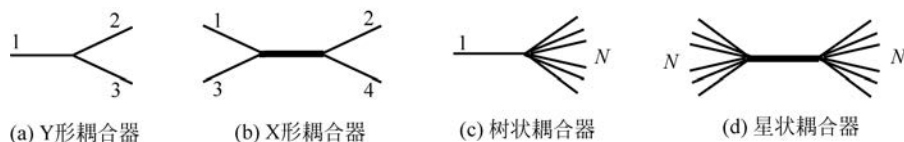


图 3-10 几种典型光耦合器端口排布示意图

3.2.1 光纤耦合器

1. 2×2 光纤耦合器

全光纤耦合器的制造工艺有磨抛法、腐蚀法和熔融拉锥法。磨抛法是把裸光纤按一定曲率固定在开槽的石英基片上, 并在光纤侧面进行研磨抛光, 以除去一部分包层, 然后再把两块这种磨抛好的裸光纤拼接在一起, 利用透过纤芯-包层界面的消逝场产生耦合以构成定向耦合器, 如图 3-11(a)所示。这种方法的缺点是器件的热稳定性和机械稳定性差。腐蚀法是用化学方法把一段裸光纤包层腐蚀掉, 再把两根腐蚀后的光纤扭绞在一起构成光纤耦合器。其缺点是工艺一致性以及热稳定性较差, 且损耗大。熔融拉锥法是将两根(或两根以上)除去涂覆层的光纤以一定的方法靠拢, 在高温加热下熔融, 同时向两侧拉伸, 最终在加热区形成双锥体形式的特殊波导结构, 如图 3-11(b)所示。通过控制光纤扭转的角度和拉伸的长度, 得到不同的分光比例, 最后把拉锥区用固化胶固化在石英基片上插入不锈钢管内构成耦合

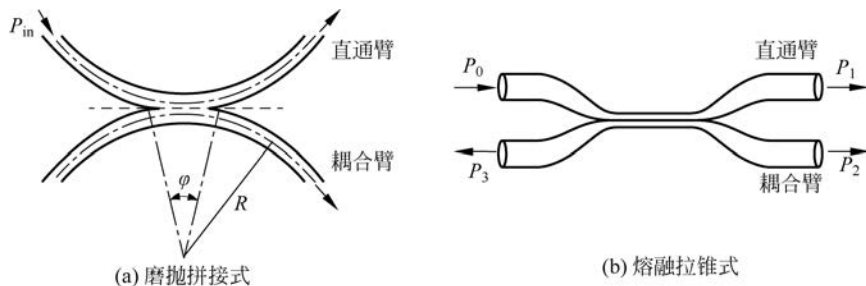


图 3-11 光纤耦合器的耦合区及形成

器。与其他两种方法相比,采用熔融拉锥技术制作的光纤耦合器具有较好的实用性。

很多学者从不同角度对光纤耦合器机理进行了分析研究,提出了不同的近似模型,下面以 2×2 耦合器为例介绍一种单模光纤耦合器的耦合机理。当两根具有相同结构特性的光纤纤芯接近后,可用耦合模方程来分析两纤芯中光信号的耦合,即

$$\frac{dP_1}{dz} = j\beta P_1 + C_1 P_2 \quad (3-1)$$

$$\frac{dP_2}{dz} = j\beta P_2 + C_2 P_1 \quad (3-2)$$

式中, P_1 ——直通臂中的传输功率;

P_2 ——进入耦合臂中的功率;

β ——两根光纤的传输常数;

C_1 和 C_2 ——直通臂至耦合臂及相反过程的耦合系数,一般 $C_1 = -C_2 = C$, C 代表一根光纤中导模的消逝场通过耦合区进入另一根光纤激励起光导模的有效程度。

对于熔融阶跃弱导拉锥形光纤耦合器,耦合系数 C 可近似表示为

$$C = \frac{\lambda}{2\pi n_1} \cdot \frac{u}{a^2 V^2} \cdot \frac{K_0(\omega d/a)}{K_1^2(\omega)} \quad (3-3)$$

式中, λ ——光波长;

n_1 ——纤芯折射率;

d ——光纤纤芯间距;

a ——纤芯半径;

V ——归一化频率;

u 和 ω —— HE_{11} 模横向传播常数;

K_0 和 K_1 ——零阶贝塞尔函数和一阶贝塞尔函数。

对式(3-1)和式(3-2)积分,可求得两光纤中的光功率分布为

$$P_1 = P_0 \cos^2(Cz) \quad (3-4)$$

$$P_2 = P_0 \sin^2(Cz) \quad (3-5)$$

式中, P_0 —— $z=0$ 处输入至输入光纤中的光功率。

图 3-12 展示了耦合区两纤芯中光功率随耦合区长度的耦合交换规律。光纤耦合器可根据耦合比要求决定拉伸长度,但拉伸长度太长,纤芯变得过细后将会引起能量辐射,插入损耗明显增加。

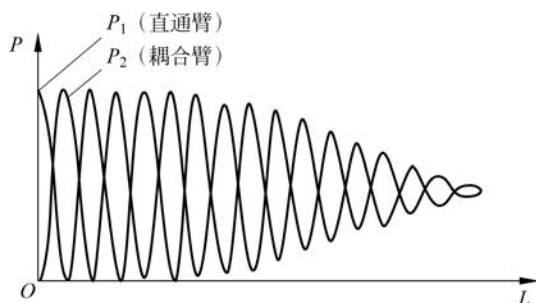


图 3-12 光纤耦合器中直通臂和耦合臂中光功率周期耦合过程

多模光纤耦合器与单模光纤耦合器不同。在多模光纤耦合器中,当纤芯中的导模传到拉细的锥形耦合区后,高阶模的入射角超过纤芯-包层边界角而溢出到包层,成为包层模在包层中传输,而低阶模仍在原来纤芯中传输。当锥形区又变粗后,高阶模会再次被束缚于纤芯中成为导模,由于这时熔融的锥形耦合区具有同样的包层,因而进入纤芯的高阶模功率对两根光纤是共有的,并在两根光纤的输出部分平分,总功率分光比将取决于锥形耦合区长度和包层厚度。

2. 光纤耦合器的性能指标

表征光纤耦合器的主要性能参数有分光比或耦合比、信道插入损耗、附加损耗与串扰。

1) 分光比或耦合比

分光比 S_R 表示某一输出端口(j)光功率 P_j 与各输出端口总输出功率之比,即

$$S_R = \left[\frac{P_j}{\sum_j P_j} \right] \times 100\% \quad (3-6)$$

调节光纤耦合器的耦合区长度即可达到所要求的分光比。

2) 信道插入损耗

信道插入损耗 L_{i-j} 表示由输入信道(i)至指定输出信道(j)的损耗,定义为

$$L_{i-j} = 10 \lg \frac{P_i}{P_j} \text{ (dB)} \quad (3-7)$$

3) 附加损耗

附加损耗 L_e 表示由耦合器带来的总损耗,定义为输出信号功率之和与输入功率之比

$$L_e = 10 \lg \frac{P_{in}}{\sum_j P_j} \text{ (dB)} \quad (3-8)$$

性能优良的定向耦合器其附加损耗应小于 1dB。

4) 串扰

串扰 L_c 表示一个端口的输入信号与散射或反射回另一个输入端口的光功率比值的对数,而其比值倒数的对数称为隔离度。以如图 3-11(b)所示的 2×2 光纤耦合器为例,串扰 L_c 可表示为

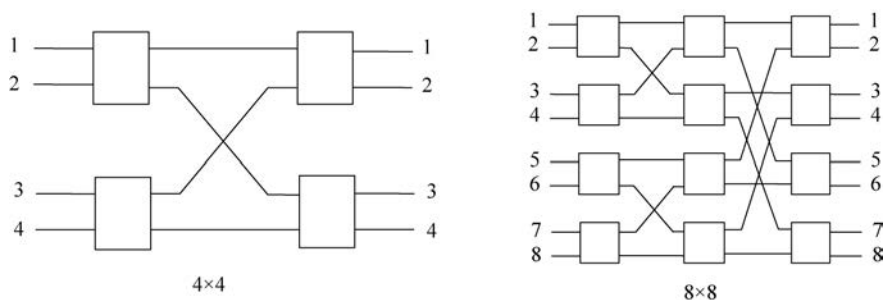
$$L_c = 10 \lg \frac{P_3}{P_0} \text{ (dB)} \quad (3-9)$$

理想耦合器的串扰应为零(用分贝表示则为负无穷大),隔离度为无穷大。实际耦合器的串扰不可能为零,好的定向耦合器的隔离度应大于 40dB。

3. 光纤星状耦合器

用熔拉双锥技术制造多模光纤星状耦合器比较容易,熔融锥式树状和星状多模光纤耦合器的耦合特性对模式比较敏感,输出端的功率变化较大。而对于单模光纤,这种多芯熔锥式星型耦合器需要精确地调整多根光纤消逝场间的耦合,实现起来较为困难,因而通常采用多个 2×2 单模光纤耦合器级联的方法来构成 $N \times N$ 星状耦合器。如图 3-13 所示,将 4 个 2×2 光纤耦合器级联可构成 4×4 耦合器,将 12 个 2×2 耦合器级联可构成 8×8 耦合器。采用类似的方法,可以将 1×2 或 2×2 耦合器逐级串联,构成 $2 \times N$ 或 $2 \times N$ 树状耦合器。

多模光纤星状耦合器所用的光纤为渐变型 $50\mu\text{m}/125\mu\text{m}$ 、 $65\mu\text{m}/125\mu\text{m}$ 、 $85\mu\text{m}/125\mu\text{m}$

图 3-13 基于 2×2 耦合器级联的 $N \times N$ 星状耦合器

和 $100\mu\text{m}/140\mu\text{m}$ 光纤,如加拿大 Ganstar 公司生产的 HLS $M \times N$ 系列星状耦合器,端口数达到 64×64 ,附加损耗 3.5dB,端口间分配不均匀性为 2.5dB。单模星状耦合器所用光纤为 $9/125\mu\text{m}$ 单模光纤,国产 GF-15 型 16×16 星状耦合器附加损耗小于或等于 1.4dB,不均匀性小于或等于 $\pm 0.8\text{dB}$ 。多模光纤树状耦合器附加损耗为 $1 \sim 2\text{dB}$,国产单模光纤树状耦合器附加损耗小于或等于 0.5dB。

3.2.2 平面光波导耦合器

1. 平面光波导技术

平面光波导(Plane Lightwave Circuit, PLC)技术是将若干无源光波导器件制作在同一基片上,通过平面波导互连,构成一定的功能回路。由于平面光波导是通过控制折射率来设计器件,因此材料的选择成为重点。目前,PLC 光器件材料主要有铌酸锂(LiNbO_3)、Ⅲ-V 族半导体化合物、二氧化硅(SiO_2)、绝缘体上的硅(Silicon-on-Insulator, SOI)、聚合物(Polymer)和玻璃。

平面光波导器件根据不同的材料而有不同制程。铌酸锂波导是通过在铌酸锂晶体上扩散 Ti 离子形成波导,波导结构为扩散型;InP 波导以 InP 为衬底和下包层,以 InGaAsP 为纤芯,以 InP 或者 InP/空气为上包层,波导结构为掩埋脊形或者脊形;二氧化硅波导以硅片为衬底,以不同掺杂的 SiO_2 材料为纤芯和包层,波导结构为掩埋矩形;SOI 波导是在 SOI 基片上制作,衬底、下包层、纤芯和上包层材料分别为 Si、 SiO_2 、Si 和空气,波导结构为脊形;聚合物波导以硅片为衬底,以不同掺杂浓度的 Polymer 材料为纤芯,波导结构为掩埋矩形;玻璃波导是通过在玻璃材料上扩散 Ag 离子形成波导,波导结构为扩散型。

2. PLC 光分路器

根据应用要求的不同,可采用平面光波导技术制作各种不同结构和功能的 PLC 光分路器芯片(chip),如图 3-14 所示。

PLC 光分路器(模块)的基本结构如图 3-15 所示,它主要由 PLC 光波导芯片、V 形槽,光纤和光纤带以及封装盒构成。图 3-16 是盒式 PLC 光分路器和机架式 PLC 光分路器的实物照片。

3. PLC 星状光耦合器

图 3-17 是一种基于平面光波导技术制作的 $N \times N$ 星状光耦合器的结构原理图,它是在对称扇形结构的输入和输出波导阵列之间插入一块聚焦平板波导区(自由空间耦合区)。



材料

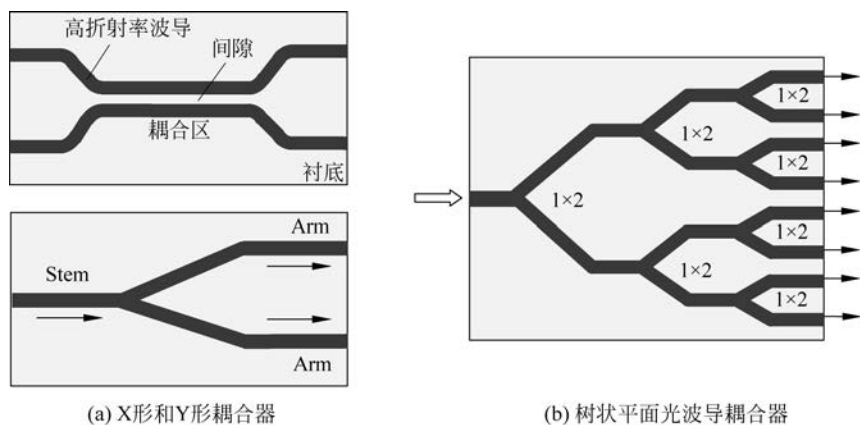


图 3-14 平面光波导耦合器芯片

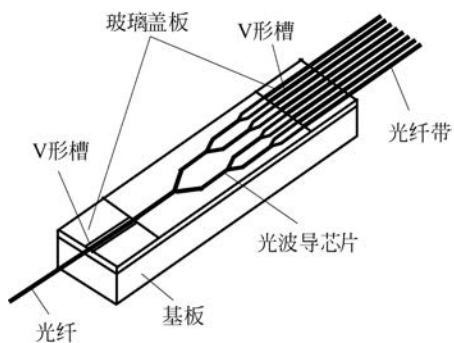


图 3-15 PLC 光分路器结构



(a) 盒式



(b) 机架式

图 3-16 PLC 光分路器

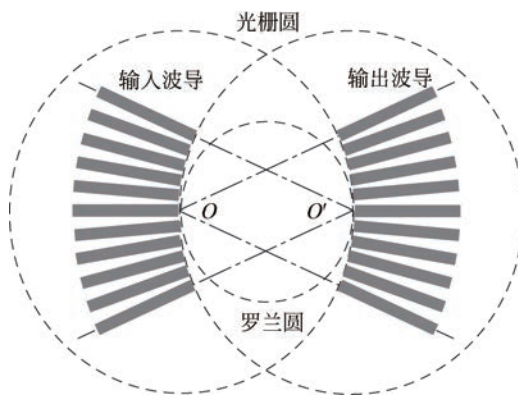


图 3-17 采用平面波导技术制作的多端星状光耦合器结构原理

自由空间耦合区两边输入/输出波导的位置满足罗兰圆(Rowland Circle)和光栅圆规则,即输入/输出波导的端口以等距离设置在半径为 R 的光栅圆圆周上,并对称分布在聚焦平面波导的两侧,输入波导端面法线方向指向右侧光栅圆的圆心 O' 点,而输出波导端面法线方向指向左侧光栅圆的圆心 O 点。两个光栅圆的圆心在中心输入/输出波导的顶部,并使中心输入和输出波导位于光栅圆和罗兰圆的切点处。

当光在左侧任一波导输入时,光信号功率以波导基模激励中心耦合区,然后以辐射模形式向右边传播,照射右侧的接收阵列波导,激励接收阵列波导,最后光信号几乎均匀分配到每个输出端。

3.3 可调谐光滤波器

可调谐光滤波器是一种重要的波长(或频率)选择器件,它的功能是从宽谱光源或多频信道中选择一个特定频率的光信号。可调谐光滤波器的基本功能如图 3-18 所示,其中, $\Delta f_{\text{ch}}(\Delta\lambda_{\text{ch}})$ 为信道间隔, $\Delta f(\Delta\lambda)$ 为滤波器能够选择的最高频率(最短波长)和最低频率(最长波长)间的差,称为可调谐光滤波器的调谐范围。如果调谐范围 $\Delta\lambda$ 覆盖了光纤整个 $1.3\mu\text{m}$ 或 $1.5\mu\text{m}$ 低损耗窗口,则其值应为 $200\text{nm}(25000\text{GHz})$,实际系统的要求往往小于这个数值。 $T(f)$ 为滤波器的传输函数, $\Delta f_{\text{F}}(\Delta\lambda_{\text{F}})$ 为滤波器的通道带宽(3dB 带宽)。

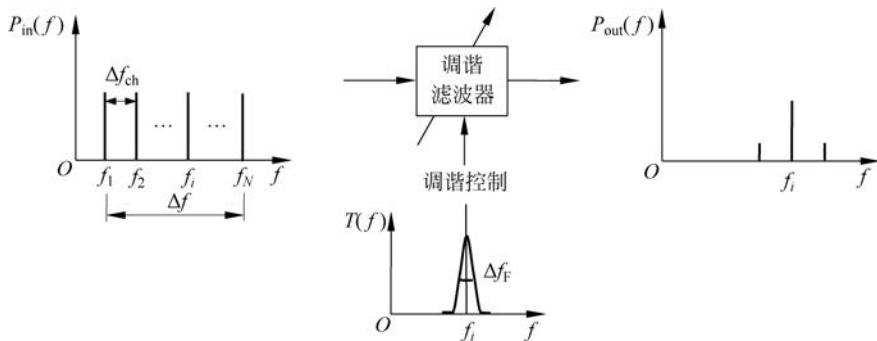


图 3-18 可调谐光滤波器的基本功能

从系统应用的观点来看,对于光滤波器的基本要求是带宽必须足够大,以传输所选择信道的全部频谱成分,但带宽又不能太大,以避免邻近信道的串扰。另外,可调谐光滤波器还要求调谐范围宽(覆盖整个系统的波长复用范围),调谐速度快,插入损耗小,对偏振不敏感。除此之外,可调谐光滤波器还要求稳定性好,受环境温度、湿度和振动的影响小。

本节介绍几种典型的可调谐光滤波器,包括法布里-珀罗(Fabry-Perot, F-P)可调谐滤波器、马赫-泽德(Mach-Zehnder, M-Z)可调谐滤波器、电光/声光可调谐滤波器和阵列波导光栅可调谐滤波器。

3.3.1 法布里-珀罗可调谐滤波器

1. 法布里-珀罗滤波器

如图 3-19(a)所示,法布里-珀罗滤波器(F-P 滤波器)的基本结构由一对平行的高反射镜以及高反射镜之间的法-珀腔(F-P 腔)构成,它是基于多光束干涉来选择所需的波长。当 F-P 腔的光学长度为光波半波长的整数倍时,相应的波长的光波满足 F-P 腔的谐振条件,具有最大的透射率。F-P 腔产生谐振的条件可表示为

$$nL \cos\theta = \frac{m\lambda}{2}, \quad m = 1, 2, 3, \dots \quad (3-10)$$

式中, n ——腔内介质折射率;



视频

L ——腔长;
 θ ——入射角;
 λ ——中心(谐振)波长;
 m ——干涉级数。

当频率为 f 的入射光垂直镜面入射(正入射)时,对于理想的 F-P 滤波器,其功率传输系数 $T(f)$ 是艾里函数,可表示为

$$T(f) = \left[1 + \frac{4R}{(1-R)^2} \sin^2 \left(\frac{2\pi f n L}{c} \right) \right]^{-1} \quad (3-11)$$

图 3-19(b)给出了 3 种端面反射率情况下 F-P 滤波器的传输特性,可见 F-P 滤波器的功率传输系数是一周期函数,它具有多个谐振峰。定义相邻的两中心频率(波长)之差为滤波器的自由谱区(Free Spectral Range, FSR),即

$$\text{FSR} = \frac{c}{2nL} \quad (3-12)$$

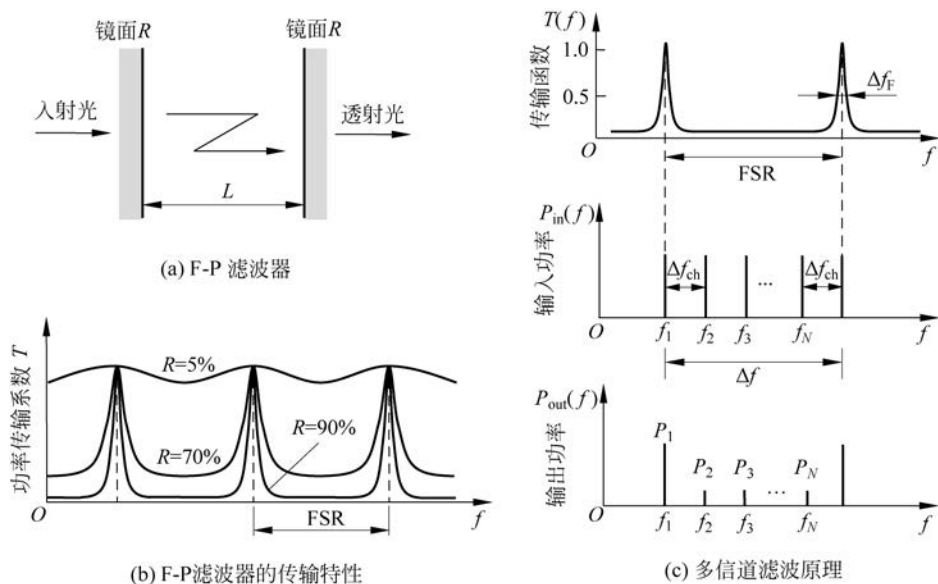


图 3-19 F-P 滤波器传输特性及其滤波原理

将 F-P 滤波器用于波分复用系统中,如图 3-19(c)所示,如果信道频率 f_1 正好对准功率传输系数的谐振峰,则只有 $f = f_1$ 的信道才能通过滤波器,而其他信道被抑制。但由于传输特性的非理想性,其他信道的信号也有一小部分通过滤波器,从而造成对 f_1 信道的干扰。如果复用信号的信道间隔为 Δf_{ch} ,信道数为 N ,则滤波器的 FSR 必须大于复用信号的总带宽 $N\Delta f_{ch}$,即应有 $\text{FSR} > N\Delta f_{ch}$ 。

F-P 干涉滤波器的带宽也是滤波器的一个重要参数,滤波器的 3dB 带宽(FWHM)定义为功率传输系数降为最大值一半时所对应的频带宽度,由式(3-11)可得

$$\Delta f_{\text{FWHM}} = \frac{c}{2nL} \cdot \frac{1-R}{\pi\sqrt{R}} \quad (3-13)$$

滤波器的带宽应该足够大,以便让所选信道的整个频谱成分通过,但带宽又不能太大,

以避免邻近信道的串扰。对于 F-P 干涉滤波器,为使串扰低于 0.5dB,信道间隔不应小于 $3\Delta f_{FWHM}$,这样可得 F-P 干涉滤波器最多可以选择的信道数为

$$N < \frac{FSR}{\Delta f_{ch}} = \frac{FSR}{3\Delta f_{FWHM}} = \frac{F}{3} \quad (3-14)$$

式中, F ——F-P 滤波器的精细度(Fineness), $F = FSR/\Delta f_{FWHM}$,它决定了滤波器的选择性,即能分辨的最小频差,从而决定了所能选择的最大信道数。

由式(3-12)和式(3-13)可知,如不考虑损耗,精细度 F 由镜面反射率 R 决定,即

$$F = \frac{\pi\sqrt{R}}{1-R} \quad (3-15)$$

则 F-P 滤波器可以选择出的最大信道数为

$$N < \frac{\pi\sqrt{R}}{3(1-R)} \quad (3-16)$$

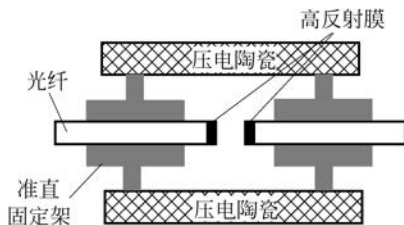
由此可见,增大 R 值时, F 可增大,可选择出的最多信道数亦可增大。例如,当 $R = 0.99$ 时, $F > 300$, $N > 100$ 。对于 $F = 100$, $R = 97\%$ 的单腔 F-P 滤波器,因为其精细度 F 不能做得很高,为避免串话,允许的最大可选择信道数为 100。如果采用两个单腔 F-P 滤波器级联,可使精细度增大到 1000,从而最大可选择信道数可以高一个数量级。

为了将 F-P 滤波器从一个信道调谐到另外一个信道,必须改变 F-P 腔谐振条件,调谐 F-P 滤波器的参数,如腔内介质折射率或腔长,对应的谐振波长变化,从而实现透射波长的调谐。目前用于光通信或光纤传感系统的可调谐 F-P 滤波器主要有基于透镜扩束的传统 F-P 滤波器、微机电系统(MEMS)可调谐 F-P 滤波器、液晶或电光晶体可调谐 F-P 滤波器和全光纤结构可调谐 F-P 滤波器等几种。

2. 光纤 F-P 可调谐滤波器

图 3-20(a)为一种采用压电调谐技术的光纤 F-P 可调谐滤波器结构原理图,它将两根光纤端面抛光,再镀上高反膜,两光纤端面之间空气隙形成谐振腔,外加电压可使压电陶瓷(PZT)材料产生电致伸缩而改变谐振腔的长度,从而实现调谐。光纤 F-P 可调谐滤波器的优点是调谐范围宽、带宽窄、偏振相关性(PDL)小,其缺点是边带抑制效果差、采用压电调谐时调谐速度慢(ms 量级)、对温度和振动较敏感。

图 3-20(b)是一种基于全光纤 F-P 标准具技术的光纤可调谐滤波器,它采用无透镜光纤结构,具有很高的精细度。例如,工作波段为 1520~1570nm(C 波段)的光纤 F-P 滤波器,其自由光谱区 FSR 为 15000GHz,3dB 带宽为 15GHz,精细度为 1000,插入损耗小于 3dB,偏振相关损耗小于 0.2dB,一个自由光谱区的调谐电压小于 18V,最大调谐速度为 800Hz,最大调谐电压为 70V。



(a) 光纤 F-P 可调谐滤波器结构原理



(b) 光纤 F-P 可调谐滤波器实物

图 3-20 光纤 F-P 可调谐滤波器

3.3.2 马赫-泽德可调谐滤波器

图 3-21 为马赫-泽德(Mach-Zehnder, M-Z)滤波器的结构原理图,它由两个 2×2 3dB 耦合器和长度差为 ΔL 的两分支光通道构成,实质上它就是一个马赫-泽德干涉仪(MZI)。



图 3-21 M-Z 滤波器结构原理图

波长分别为 λ_1 和 λ_2 的光信号从输入耦合器的 1 端口输入,经过输入 3dB 耦合器后光功率都平均分配到两个分支光通道上,由于两分支光通道的长度差为 ΔL ,所以经过两分支光通道后到达输出耦合器时就产生一个与波长(频率)相关的相位差 $\Delta\varphi$ ($\Delta\varphi = 2\pi f n \Delta L / c$),式中 n 是波导折射率。当满足一定相位条件时,光信号经输出 3dB 耦合器复合后在两个输出端口中的一个端口相长干涉,而在另一个端口相消干涉。比如,在输出端口 3, λ_1 满足相消干涉条件, λ_2 满足相长干涉条件,则 λ_2 的信号光从 3 端口输出;而在输出端口 4, λ_1 满足相长干涉条件, λ_2 满足相消干涉条件,则 λ_1 的信号光从 4 端口输出。

为分析 M-Z 滤波器的传输函数,可以将其分为 3 部分,即输入耦合器、两分支通道和输出耦合器,先分别计算各部分的传输函数,然后取 3 个传输函数之积即可得总的传输函数 $T_{M-Z}(f)$ 。当忽略耦合器的附加损耗时,3dB 耦合器的传输矩阵为

$$[T_1(f)] = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & -j \\ -j & 1 \end{bmatrix} \quad (3-17)$$

时延差为 τ 的两条不同长度光分支通道的散射矩阵为

$$[T_2(f)] = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \exp(-2\pi j f \tau) \end{bmatrix} \quad (3-18)$$

由此可得 M-Z 滤波器的传输函数为

$$\begin{aligned} [T_{M-Z}(f)] &= \begin{bmatrix} T_{13}(f) & T_{14}(f) \\ T_{23}(f) & T_{24}(f) \end{bmatrix} = [T_1(f)][T_2(f)][T_1(f)] \\ &= \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 - \exp(-2\pi j f \tau) & -j[1 + \exp(-2\pi j f \tau)] \\ -j[1 + \exp(-2\pi j f \tau)] & -[1 - \exp(-2\pi j f \tau)] \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3-19)$$

其功率传输函数为

$$\begin{bmatrix} |T_{13}(f)|^2 & |T_{14}(f)|^2 \\ |T_{23}(f)|^2 & |T_{24}(f)|^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos^2(\pi f \tau) & \sin^2(\pi f \tau) \\ \sin^2(\pi f \tau) & \cos^2(\pi f \tau) \end{bmatrix} \quad (3-20)$$

通常,复用信号在 M-Z 滤波器两个输入端口中的一个端口输入,因而式(3-20)变为

$$\begin{bmatrix} |T_{13}(f)|^2 \\ |T_{14}(f)|^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos^2(\pi f \tau) \\ \sin^2(\pi f \tau) \end{bmatrix} \quad (3-21)$$

可见, M-Z 滤波器的功率传输函数是频率的周期函数,周期 $\tau = n \Delta L / c$ 。因此,若有两个频

率分别为 f_1 和 f_2 (分别对应 λ_1 和 λ_2) 的光波从端口 1 输入且分别满足

$$\pi\tau f_1 = (2m-1)\pi/2, \quad \pi\tau f_2 = m\pi, \quad m=1,2,3,\dots \quad (3-22)$$

则 $T_{13}(f_1)=0, T_{14}(f_1)=1, T_{13}(f_2)=1, T_{14}(f_2)=0$ 。也就是说,在同一输入端输入频率间隔为 $\Delta f=1/2\tau=c/(2n\Delta L)$ 的两个光波将分别在不同的输出端口输出。

M-Z 滤波器要求输入光波的频率间隔必须精准控制在 $\Delta f=c/(2n\Delta L)$ 的整数倍。当输入信号波长数为 4 个时,需要 3 个 M-Z 滤波器级联,当波长数为 8 个时,需要 3 级共 7 个 M-Z 滤波器级联,而且要使第一级的频率间隔为 Δf ,第二级的频率间隔为 $2\Delta f$,第三级的频率间隔为 $4\Delta f$,才能将它们分开,如图 3-22 所示。

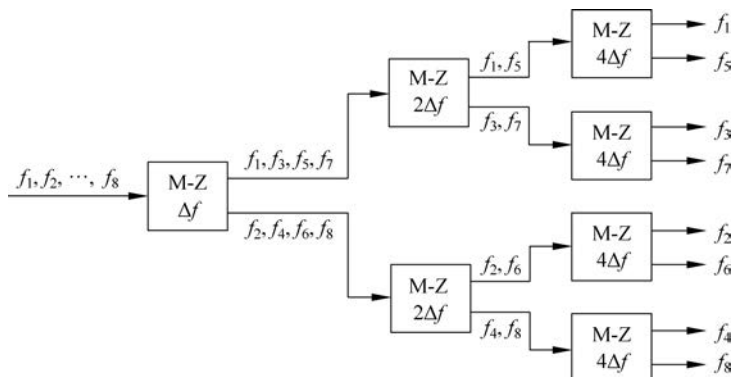


图 3-22 级联 M-Z 滤波器

级联 M-Z 滤波器除了可用多个分立的光纤耦合器串接而成外,也可以用平面光波导来实现。在用 PLC 做成的 M-Z 滤波器中,调谐是通过沉积在每个 M-Z 滤波器一个臂上的铬薄膜加热器来实现的。M-Z 可调谐滤波器制造成本较低,对偏振不敏感,串扰很低,但因为采用热调谐方法,其调谐控制较为复杂,调谐速度较慢,约为 1ms。

3.3.3 声光、电光可调谐滤波器

1. 声光可调谐滤波器(AOTF)

图 3-23 是在 LiNbO_3 衬底上用钛(Ti)扩散波导制成的声光可调谐滤波器(Acoustic Tunable Filter, AOTF)结构示意图,其工作原理为:多信道光信号光进入滤波器后,输入偏振分束器将信号光分成 TE 和 TM 偏振信号,TE 偏振态光波沿着上臂传输,而 TM 偏振态光波沿着下臂传输;超声波换能器(Transducer)产生表面声波(Surface Acoustic Wave,

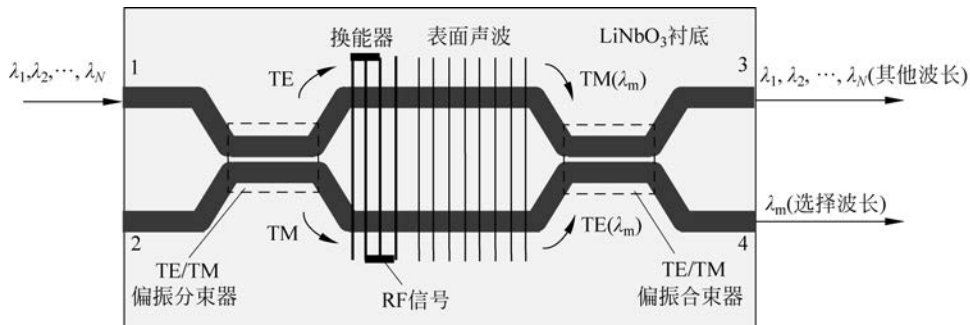


图 3-23 声光可调谐滤波器结构示意图

SAW),引起 LiNbO_3 折射率周期性扰动而形成一种感应光栅。当某特定波长光信号(λ_m)满足相位匹配条件(布拉格条件)时,其输入和输出光波的偏振方向将产生 90° 旋转,即上臂中传输的 TE 偏振态光波变成 TM 偏振态光波,而下臂中传输的 TM 偏振态光波变成 TE 偏振态光波,然后通过输出偏振合束器合束后从输出端输出,从而实现波长选择;其他波长信道由于不满足相位匹配条件,因此通过扰动区后偏振态不会发生改变,并由输出偏振合束器合束后转移到另一个输出端口输出。

声光可调谐滤波器的选择信道波长 $\lambda_m = \Delta n \Lambda$, 其中, Λ 是表面声波形成的光栅周期,其值等于材料中声波的波长, $\Delta n = n_{\text{TE}} - n_{\text{TM}}$ 是 LiNbO_3 材料对于 TE 波和 TM 波的折射率差。声光滤波器调谐是通过改变表面声波的频率(几十至几百兆赫兹)来实现的,其调谐范围可以覆盖整个 $1.3 \sim 1.6 \mu\text{m}$ 波段,但由于其调谐时间受声波填满相互作用长度的过程所需时间的限制,通常在微秒范围。声光可调谐滤波器的带宽和插入损耗分别约为 1nm 和 5dB 。

在声光可调谐滤波器中,当换能器产生多个不同频率的表面声波时,在相互作用长度上会形成几个感应光栅,这样滤波器就具有独特的多波长同时选择特性,这可能是不同声波间的相互作用比较弱而导致的。声光可调谐滤波器可以同时选择的信道数受换能器不出现毁坏所容许的最大射频驱动功率限制。采用基础光学结构形式的声光可调谐滤波器,每选一个信道需要几毫瓦的驱动功率。

在 AOTF 中无可移动的部分,施加信号的变化可有序或无序地实现高速波长调谐,使之具有调谐范围宽、调谐速度快以及隔离度高等特性。但是由于 AOTF 器件的插入损耗大、边模抑制特性差、偏振敏感等问题,其实用化受到一定程度的限制。

2. 电光可调谐滤波器(EOTF)

电光可调谐滤波器如图 3-24 所示,其构成及工作原理与声光可调谐滤波器非常相似,不过其感应光栅是基于 LiNbO_3 材料的电光效应而形成的。当给印刷在器件表面上的梳状电极施加驱动电压(约 100V)时,在相互作用长度上则形成折射率的周期性光栅。通过改变驱动电压,改变折射率差 Δn ,从而达到调谐的目的。

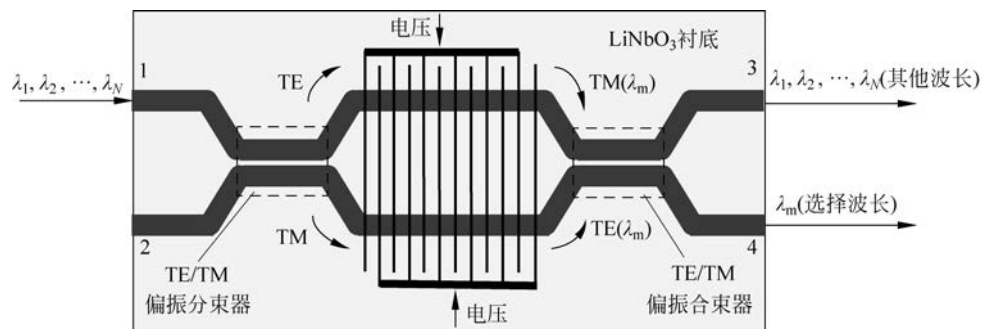


图 3-24 电光可调谐滤波器结构示意图

电光可调谐滤波器基于电光效应通过电信号调谐,其调谐速度很快,可达到纳秒量级,但其调谐范围不大,约十几纳米。



视频

3.3.4 阵列波导光栅滤波器

1. 阵列波导光栅(AWG)

如图 3-25 所示,阵列波导光栅(Arrayed Waveguide Gratings, AWG)由输入波导、输入星状耦合器、阵列波导、输出星状耦合器和输出波导阵列 5 部分组成,其中,阵列波导中相邻波导间具有恒定的路径长度差 ΔL 。AWG 的波导可以沉积在 Si 或 InP 衬底上, SiO_2/Si 和 InGaAsP/InP 是目前最成熟的材料系统。

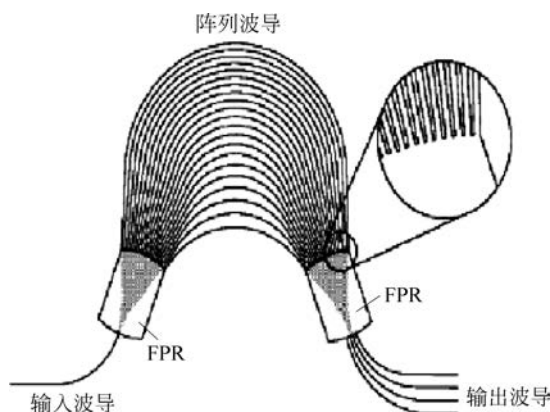


图 3-25 阵列波导光栅结构示意图

在 AWG 中,输入星状耦合器的输入波导端口位于罗兰圆上,而阵列波导的输入端口位于两倍直径的光栅圆圆周上,如图 3-26(a)所示。输出星状耦合器的输出波导阵列端口位于罗兰圆上,而阵列波导的输出端位于两倍直径的光栅圆圆周上,如图 3-26(b)所示。输入星状耦合器和输出星状耦合器为镜像关系,如在图 3-26 中,输入波导 A 镜像为输出波导阵列中的波导 C,而阵列波导相当于一个凹面反射型光栅,与普通凹面光栅(在凹球面上刻画一系列等间距的线条,同时具有衍射和聚焦两种功能)的区别是在相邻光栅单元之间引入了光程差 $n_A \Delta L$ 。

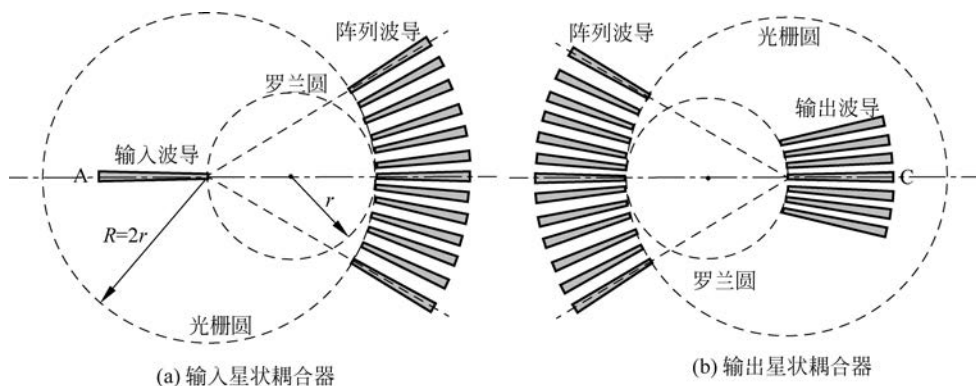


图 3-26 输入/输出星状耦合器的原理结构示意图

如图 3-27 所示,与凹面光栅的衍射特性类似,从波导 C 发出的光,在阵列波导的输出端发生反射型衍射,不同波长光的衍射角 θ 不同,从而被不同输出波导接收。因此,当 N 个不同波长的复用信号从 AWG 的输入端口输入时,通过器件后依波长的不同出现在不同的波

导出口上,即可实现多波长光信号的分路。同样,AWG 也可实现对多端口输入的多波长信号进行合路。

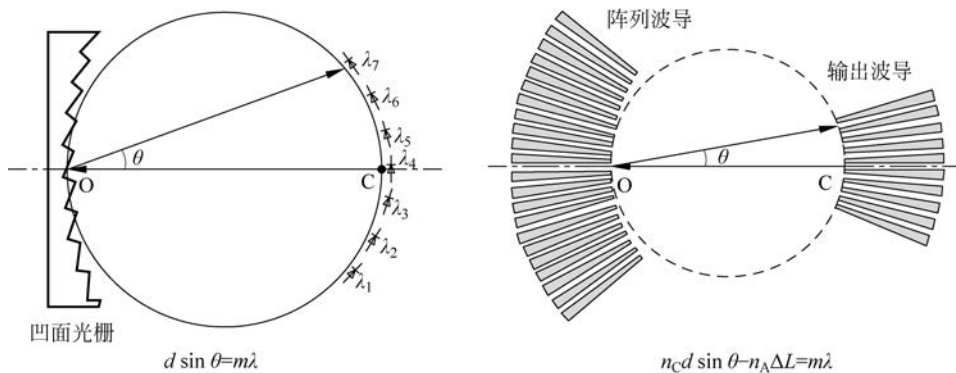


图 3-27 AWG 原理示意图

2. 基于 AWG 的可调谐滤波器

图 3-28 为一种基于 AWG 和半导体光放大器(SOA)的数字调谐滤波器结构原理图,这种数字调谐滤波片芯片是在 InP 衬底集成了两个 AWG 和一个 SOA 阵列, PIC(Photonic Integrated Circuit)芯片尺寸为 $6\text{mm} \times 18\text{mm}$ 。第一个 AWG 用于多波长复用信号的分路,即把输入的复用信号的频谱分开,然后将不同波长的光信号送入与它相连的 SOA。光信号通过 SOA 后被放大或被衰减,放大相当于让其通过,衰减相当于阻断,起到滤波器的作用。第二个 AWG 用作多波长信号的合路,即重新复合 SOA 的输出信号到输出端。这种滤波器通过给不同 SOA 加载驱动电流来实现不同波长信道的选择。此外,对于功率电平低的信道,可以增加与它相连的 SOA 的增益,从而使得该滤波器又能起到功率均衡的作用。

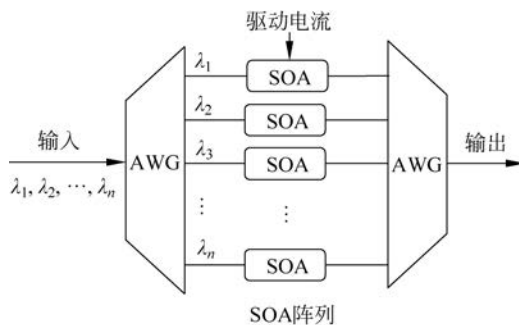


图 3-28 基于 AWG 和 SOA 的数字调谐滤波器

在以上滤波器结构中,当复用信号有很多信道时,必须使用许多作为选通门的 SOA,为了减少使用 SOA 的数量, NTT 提出了一种新的滤波器结构,如图 3-29 所示。这种 64 信道 AWG 数字滤波器除了在 1×8 输入 AWG 和 8×8 输出 AWG 之间加入 SOA 阵列外,还在输出 AWG 输出端又增加了第二级 SOA 阵列,并在输出端前设置了一个 8×1 多模干涉耦合器(MMI)和一个功率增强 SOA。这种结构只用了 16 个 SOA 就可以选择 64 个复用信道, InP 集成 PIC 芯片尺寸为 $7\text{mm} \times 7\text{mm}$, MMI 尺寸为 $260\mu\text{m} \times 32\mu\text{m}$, 16 个 SOA 均为 $600\mu\text{m}$ 。前端 AWG 是高分辨率器件,信道间隔为 50GHz , FSR 为 400GHz 。后端 AWG 是低分辨率器件,信道间隔为 400GHz , FSR 为 3.2THz 。

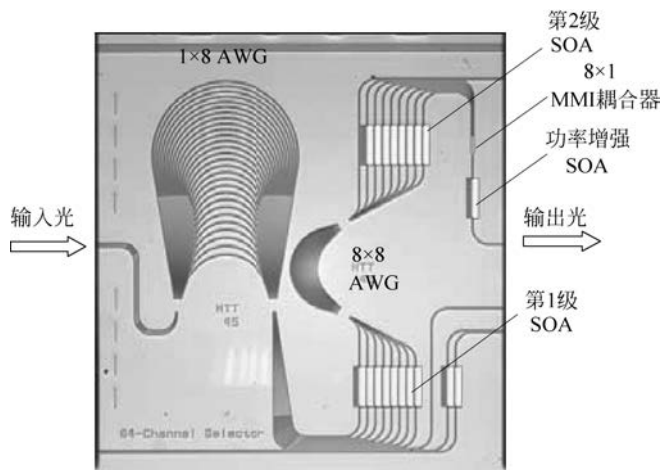


图 3-29 基于 AWG 的 64 信道数字调谐滤波器

这种滤波器的工作原理如下：首先，把 64 路复用信号波长分成 8 组，每组 8 个信号，由 1×8AWG 完成，信道光频间隔为 400GHz，正好等于前端 AWG 的 FSR；其次，8 个波长为一组的信号被第一级 SOA 选通，并由后端 8×8AWG 解复用；最后，8 个信号为 1 组的每个信号被第二级 SOA 选通，并通过 8×1MMI 耦合器输出到功率增强 SOA 进行放大输出。

表 3-1 给出了前述几类可调谐滤波器的特性比较。

表 3-1 可调谐滤波器特性比较

比 较 项 目	F-P 滤波器	M-Z 干涉滤波器	电光滤波器	声光滤波器	阵列波导光栅滤波器
调谐范围/nm	60	5~10	10	400	10~12
3dB 带宽/nm	0.5	0.01	1	1	0.5~0.68
可分辨通道数	100	100	10	10	15~30
插入损耗/dB	2~3	>5	3~5	5	1.3
调谐速度	ms	ms	ns	μs	ns

3.4 波分复用/解复用器



视频

波分复用器和解复用器(WDM/DeWDM)是 WDM 系统重要的组成部分,其原理与光滤波器类似,亦是基于器件的波长选择机制,但在网络中所起的作用略有不同。光滤波器的功能是从众多波长信道或宽谱光源中选出一个波长信号,而滤去所有其他波长信号,如图 3-30(a)所示。WDM 的功能是将不同输入端进入的不同波长信号组合在一起从共同输出端输出,如图 3-30(b)所示。DeWDM 完成的功能与 WDM 相反,是将从同一端口输入的多波长信号分离后从不同的端口输出。根据互易原理,同一 WDM 器件既有复用功能,亦有解复用功能,所以常写成 WDM/DeWDM。

波分复用器和解复用不仅用于 WDM 终端,而且也用于光网络节点做波长路由器(Wavelength Router,WR)和波长分插复用器(ADM)。WR 是一类称为波长路由网(WRN)的光网络关键设备,图 3-30(c)是一种由波分复用器和解复用器构成的两个输入端口和两个输出端口的器件,每个输入线路携带相同的一组($\lambda_1,\lambda_2,\lambda_3,\lambda_4$)WDM 信号,而调制在两输

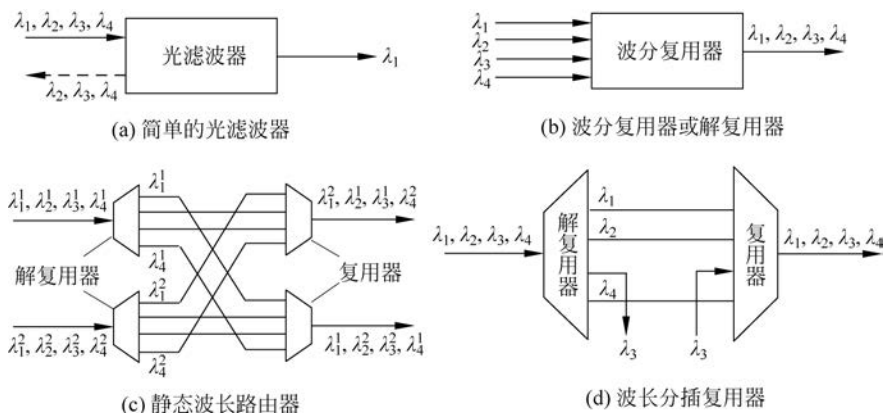


图 3-30 光通信网中波长选择器件的不同应用

入端相同波长的信号可以是不同的,通过 WR 后可实现线路间波长 λ_1 和 λ_4 的交换。图示波长路由器只有两对输入/输出端口,每个端口只有 4 个波长进出,实际上可以扩展到有任意对输入/输出端口,每个端口可有相同的任意多个波长输入/输出。原则上任一输入端的波长可以路由到任一输出端,主要限制是来自两个不同输入端的相同的波长不能路由到同一输出端。如果 WR 的波长路由模式是固定的,则称之为静态波长路由器;如果利用适当的控制信号可改变波长路由模式则称之为动态波长路由器。

波长分插复用器本质上是只有一对输入/输出端口和一对附加本地端口的波长路由器,如图 3-30(d)所示,来自本地用户波长在本地端口接入或来自输入端光纤端口的数据流波长在本地端口输出。

波分复用/解复用器作为一种特殊的有波长选择功能的耦合器,其性能及评价方法与普通耦合器及光滤波器都有相似之处,但也有不同之处。

(1) 插入损耗 L_i 。

插入损耗指特定波长信号通过 WDM 器件相应通道时所引入的功率损耗,其大小主要取决于 WDM 器件的结构类型和制造技术。此外,由于在大多数系统中偏振态是随时间随机地变化,而 WDM 器件的插入损耗还与输入信号的偏振态有关,因此输出功率亦随时间变化,所以 WDM 器件还存在一种偏振相关损耗(PDL)。

(2) 串扰或隔离度 L_c 。

隔离度指波长隔离度或通道隔离度,即在某一指定被选波长输出端口所测得的另一非选择波长功率与被选择波长输出功率之比的对数。

(3) 通道带宽 Δv_F 和通道间隔 Δv_{ch} 。

波分复用/解复用器是由多个波长通道光滤波器集合的器件,每个波长通道均可有一定频谱宽度,称为通道带宽 Δv_F 。为保证各波长通道信号无畸变复用和解复用, Δv_F 应尽可能大。为保证多通道信号复用和解复用而不致产生相邻波长通道间的串扰,相邻通道间隔 Δv_{ch} 应尽可能大,但通道间隔大将限制复用和解复用通道数。从光波通信系统信道数和通信容量的要求考虑,通常应使在光纤可用带宽内可复用的信道数 N 越大越好,而通道带宽 Δv_F 则需考虑光源线宽、待传送的光信号的速率和信号带宽 Δv_s 、接收端的解复用方案和降低串扰的基础上取较宽的值。从设计与制造角度来说,通道带宽越窄、通道数越多,技术难度越大。

(4) 温度系数。

温度系数指波分复用/解复用器件通道中心频率随温度变化产生的漂移。系统应用要求在整个工作温度范围内(典型值为 100°C),通带中心频率的漂移应远小于通道间隔。

3.4.1 介质薄膜滤波器型复用/解复用器

对于传统 F-P 滤波器,如果用多层反射介质薄膜来代替反射镜,则可构成多层介质薄膜谐振式滤波器,它亦是一种带通滤波器,可使由谐振腔的长度决定的某特定波长通过,所有其他波长被反射。当将由反射介质薄膜层隔离的多个谐振腔串联时,就可构成谐振式多腔滤波器(TFMF),如图 3-31(a)所示。多腔谐振介质薄膜滤波器的谐振腔数对滤波器传输特性的影响如图 3-31(b)所示,当腔数增加时,通带特性将变得平坦,边缘变得更陡。

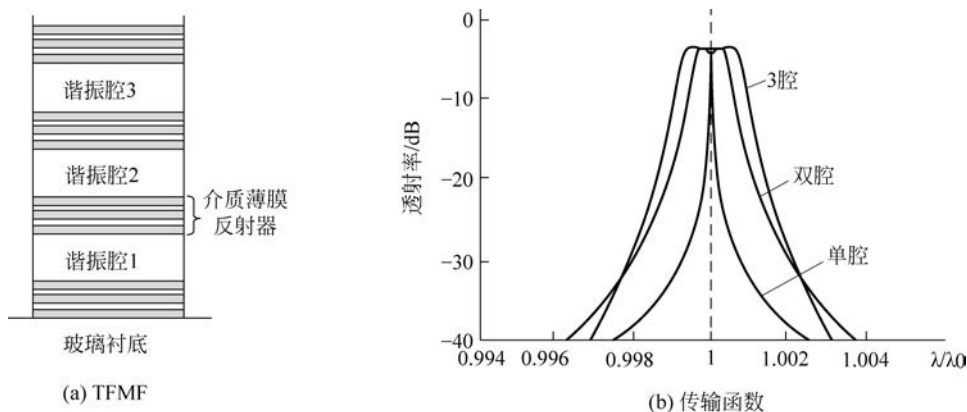


图 3-31 多腔谐振式介质薄膜滤波器及其传输特性

将多个 TFMF 级联就可构成波分复用/解复用器,如图 3-32 所示,每个滤波器通过一个不同波长,而反射其他波长。当用作解复用器时,级联系统的第一个滤波器通过 λ_1 而将其余全部波长反射至第二个滤波器,然后第二个滤波器通过 λ_2 而将其余波长反射至第三个滤波器,如此依次完成 8 个波长的解复用。根据器件的互易性,分别从 8 个端口输入的 8 个波长经过相反的过程也可复合后经一个端口输出,实现复用功能。

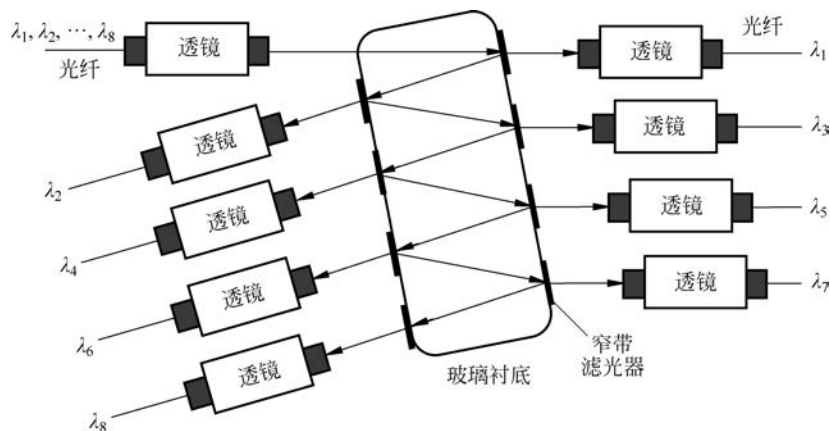


图 3-32 多层介质薄膜滤波器型复用/解复用器

多层介质薄膜干涉滤波器型 WDM 器件由于具有通带顶部平坦、边缘陡峭、损耗低、隔离度高、偏振不敏感和温度稳定性高等优点而得到广泛应用,它是 16 波长 WDM 系统中主要选用器件。一个 16 信道的多层介质薄膜干涉滤波器型 WDM 器件的典型特性参数为: 1dB 带宽 0.4nm, 20dB 带宽 1.2nm, 隔离度 25dB, 插入损耗 7dB, 偏振相关损耗 PDL 约 0.2dB, 温度系数 0.0005nm/°C。

3.4.2 M-Z 滤波器型复用/解复用器

3.3.2 节中介绍的 M-Z 干涉滤波器可以实现两个不同波长信号的分路,如果将多个这种滤波器组合起来就可以构成多个波长的复用/解复用器。图 3-33 是由 3 个 M-Z 干涉滤波器组成的 4 信道复用器。每个 M-Z 干涉滤波器的两臂具有一长度差,使两臂之间产生与波长有关的相移,光程差的选择要使两个输入端输入的不同波长光信号只传送到指定的输出端。整个结构可以用 SiO₂ 波导制作在一块硅片上。

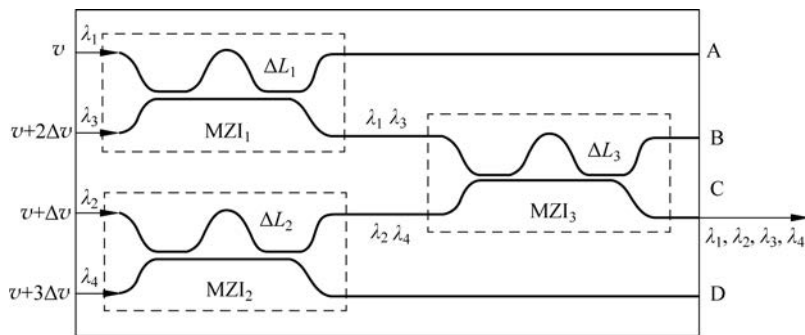


图 3-33 由 3 个 M-Z 干涉滤波器组成的 4 信道复用/解复用器

3.4.3 阵列波导光栅复用/解复用器

前面介绍了 AWG,它可以作为 $N \times 1$ 的波分复用器,此时它是一个有 N 个输入端口和一个输出端口的器件, N 个输入端口分别输入 N 个不同波长,通过该器件达到同一输出端。相反,它亦可作为 $1 \times N$ 的解复用器应用。阵列波导光栅复用/解复用器的优点是损耗低,通带平坦,易于在衬底上集成,输入和输出波导,多端口耦合器和阵列波导都可以集成在同一衬底上。

AWG 属于相位阵列光栅的范畴,其缺点是与偏振和温度有关,它是一种温度敏感器件,为减小热漂移,可以使用热电制冷器。目前,信道间隔为 250GHz 的 128 个波长 SiO₂ 阵列波导光栅复用/解复用器和信道间隔 50GHz 的 64 波长 InP 阵列波导光栅复用/解复用器已经制造出来了。阵列波导光栅复用/解复用器是 16 波长以上 WDM 系统中最具有竞争力的器件。

3.5 光调制器

在光通信系统中,光调制是用承载信息的电信号调制光源产生的光载波,从而实现光信号传输。从调制角度来看,有直接调制和外调制两种方式。直接调制是采用信号直接调制



视频

光源的输出光强,如用承载信息的信号直接调制激光器的注入电流使得输出光强随信号而变化。这种调制方式中激光的产生和调制同时实现,其结构简单、经济,但调制过程中会引入不希望的线性调频(啁啾),因而主要适用于中低速通信系统。外调制技术是在激光器后接一外调制器,用承载信息的信号通过调制器对激光器输出的光载波进行调制。外调制的优点是调制速率高,缺点是技术复杂,成本较高。对于强度调制-直接检测(IM/DD)光波系统,并非一定要用外调制方案,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。本节主要介绍铌酸锂波导电光调制器和电致吸收调制器这两种最为常用的光调制器。

3.5.1 铌酸锂波导电光调制器

1. 铌酸锂晶体的电光效应

某些晶体在外加电场的作用下,其折射率 n 随外加电场 E 的改变而发生变化的现象称为电光效应。材料的折射率 n 与施加的外加电场强度 E 之间的关系可用电场 E 的幂级数表示,即

$$n = n_0 + \alpha |E| + \beta |E|^2 + \dots \quad (3-23)$$

式中, n_0 是 $E=0$ 时材料的折射率,系数 α 和 β 均很小,高阶项的影响可以略去不计。因此电光效应分为两种类型:一种是折射率变化量与电场强度成正比,称为线性电光效应或泡克尔斯(Pockels)效应;另一种是折射率变化量与电场强度的平方成正比,称为二次电光效应或克尔(Kerr)效应。

具有电光效应的晶体称为电光晶体,主要有铌酸锂(LiNbO_3 , 简称为 LN)、砷化镓(GaAs)和钽酸锂(LiTaO_3)等。对于大多数电光晶体材料,一次电光效应要比二次电光效应显著,因此电光调制器通常利用线性电光效应,即利用电光材料的折射率 n 随施加的外电场 E 的线性变化而产生的光波传播速度和相位的变化,实现对激光的调制。

可以采用电磁理论方法对电光效应进行分析和描述,但其数学推导相当繁杂。描述和分析电光效应的另一种方法是折射率椭球体法,这种方法直观、方便,是一种常用的分析方法。在电光晶体未加外电场时,主轴坐标系中的折射率椭球可表示为

$$\frac{x^2}{n_x^2} + \frac{y^2}{n_y^2} + \frac{z^2}{n_z^2} = 1 \quad (3-24)$$

式中, x, y, z 为介质的主轴方向,也就是说,晶体内沿着这些方向的电位移 D 和电场强度 E 是相互平行的; n_x, n_y, n_z 为折射率椭球的折射率。

当给晶体施加电场后,其折射率椭球发生“变形”,椭球方程为

$$\left(\frac{1}{n^2}\right)_1 x^2 + \left(\frac{1}{n^2}\right)_2 y^2 + \left(\frac{1}{n^2}\right)_3 z^2 + 2\left(\frac{1}{n^2}\right)_4 yz + 2\left(\frac{1}{n^2}\right)_5 xz + 2\left(\frac{1}{n^2}\right)_6 xy = 1 \quad (3-25)$$

由于外电场的作用,折射率椭球的各个系数 $\left(\frac{1}{n^2}\right)_i$ 随之发生线性变化,其变化量可表示为

$$\Delta\left(\frac{1}{n^2}\right)_i = \sum_{j=1}^3 \gamma_{ij} E_j \quad (3-26)$$

式中, γ_{ij} 称为线性电光系数; $i=1, 2, \dots, 6$; $j=1, 2, 3$ 。

式(3-26)可以用张量的矩阵形式表示为

$$\begin{bmatrix} \Delta\left(\frac{1}{n^2}\right)_1 \\ \Delta\left(\frac{1}{n^2}\right)_2 \\ \Delta\left(\frac{1}{n^2}\right)_3 \\ \Delta\left(\frac{1}{n^2}\right)_4 \\ \Delta\left(\frac{1}{n^2}\right)_5 \\ \Delta\left(\frac{1}{n^2}\right)_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \gamma_{11} & \gamma_{12} & \gamma_{13} \\ \gamma_{21} & \gamma_{22} & \gamma_{23} \\ \gamma_{31} & \gamma_{32} & \gamma_{33} \\ \gamma_{41} & \gamma_{42} & \gamma_{43} \\ \gamma_{51} & \gamma_{52} & \gamma_{53} \\ \gamma_{61} & \gamma_{62} & \gamma_{63} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \\ E_z \end{bmatrix} \quad (3-27)$$

式中, E_x 、 E_y 、 E_z 分别为电场沿在 x 、 y 和 z 方向的分量; 电光系数 γ_{ij} 的矩阵称为电光张量, 每个元素的值由具体的晶体决定, 它是表征感应极化强弱的量。

铌酸锂晶体是三方晶系, 负单轴晶体, 晶轴为 z 轴, 其 x 轴方向与 y 轴方向的折射率相等, 即 $n_x = n_y = n_o$, z 轴方向的折射率 $n_z = n_e$, 对于 1550nm 的光波, $n_o = 2.286$, $n_e = 2.200$ 。铌酸锂晶体的电光系数矩阵为

$$\gamma = \begin{bmatrix} 0 & -\gamma_{22} & \gamma_{13} \\ 0 & \gamma_{22} & \gamma_{13} \\ 0 & 0 & \gamma_{33} \\ 0 & \gamma_{42} & 0 \\ \gamma_{42} & 0 & 0 \\ -\gamma_{22} & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3-28)$$

式中, $\gamma_{22} = 3.4 \times 10^{-12} \text{ m/V}$; $\gamma_{13} = 8.6 \times 10^{-12} \text{ m/V}$; $\gamma_{33} = 30.8 \times 10^{-12} \text{ m/V}$; $\gamma_{42} = 2.8 \times 10^{-12} \text{ m/V}$ 。可见, 由于铌酸锂晶体的电光系数 γ_{33} 最大, 选择该系数可以在同样条件下获得更显著的电光效应。这需要在 z 轴方向上加电场 E_z , 而 $E_x = E_y = 0$, 因此式(3-27)可简化为

$$\begin{bmatrix} \Delta\left(\frac{1}{n^2}\right)_1 \\ \Delta\left(\frac{1}{n^2}\right)_2 \\ \Delta\left(\frac{1}{n^2}\right)_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \gamma_{13} E_z \\ \gamma_{13} E_z \\ \gamma_{33} E_z \end{bmatrix} \quad (3-29)$$

折射率椭球方程变为

$$\left(\frac{1}{n_o^2} + \gamma_{13} E_z\right) x^2 + \left(\frac{1}{n_o^2} + \gamma_{13} E_z\right) y^2 + \left(\frac{1}{n_e^2} + \gamma_{33} E_z\right) z^2 = 1 \quad (3-30)$$

可以看出, 加了电场后, 铌酸锂晶体折射率椭球没有旋转, 仍为单轴晶体, 但其椭球折射

率发生了变化。如图 3-34 所示, 铌酸锂晶体采用 x 切向, y 轴方向透光, z 轴方向加电场, 根据式(3-29)可得 x 轴方向和 z 方向的折射率在电场的作用下的改变量分别为

$$\Delta n_x = -\frac{n_o^3}{2}\gamma_{13}E_z \quad (3-31)$$

$$\Delta n_z = -\frac{n_e^3}{2}\gamma_{33}E_z \quad (3-32)$$

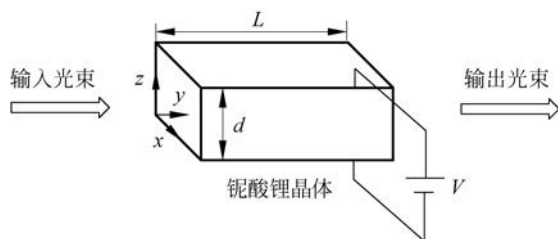


图 3-34 铌酸锂晶体的电光效应

所以, 铌酸锂晶体在施加外电场的作用下, 晶体的折射率会变小, 并且由于其张量各向异性, 在不同方向上晶体折射率减小量也不同。通过改变铌酸锂晶体的折射率就可以对输入光波进行调制。

2. LN 波导电光相位调制器

如图 3-34 所示, 若入射光为与 z 轴成 45° 角的线偏振光, 进入 LN 晶体分解为 x 和 z 方向振动的两个分量, 其折射率分别为 $(n_o + \Delta n_x)$ 和 $(n_e + \Delta n_z)$ 。若晶体长度为 L , 厚度为 d , 外加电压 $V = Ed$, 则从晶体出射的两光波的相位差为

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda}[(n_o + \Delta n_x) - (n_e + \Delta n_z)]L = \frac{2\pi}{\lambda}[(n_o - n_e)L - \frac{LV}{2d}(n_o^3\gamma_{13} - n_e^3\gamma_{33})] \quad (3-33)$$

由此可见, 光波通过晶体后的相位差包括两项: 第一项是晶体本身的自然双折射引起的相位延迟, 它与外加电场无关, 对相位调制没有贡献, 而且还会因温度变化引起折射率的变化而导致相位差漂移, 进而使调制光发生畸变, 甚至使调制器不能正常工作, 因此应设法消除或补偿双折射现象; 第二项是外加电场作用产生的相位延迟, 它与外加电场和晶体尺寸有关。

如果入射光偏振方向为 z 方向, 那么光束通过 LN 晶体不会有双折射现象, 则经过长度为 L 的晶体后, 其相位变化为

$$\Delta\varphi = -\frac{\pi}{\lambda}n_e^3\gamma_{33}\frac{V}{d}L \quad (3-34)$$

当 $\Delta\varphi = \pi$ 时, 对应的外加电压称为半波电压 V_π , 它可表示为

$$V_\pi = -\frac{\lambda d}{n_e^3\gamma_{33}L} \quad (3-35)$$

图 3-35 是一种 LN 波导电光相位调制器的立体和剖面结构, 它是在 x 切向的 LN 衬底上用钛扩散技术制成折射率比 LN 高的条形掩埋波导, 加在共平面条形电极的横向电场 E 通过波导, 两极长为 L , 间距为 d 。在电极和衬底间镀上一层很薄的电介质缓冲层(约 200nm 厚的 SiO_2), 以便把电极和衬底分开。光波导传输的模式应为 TE 模(水平偏振), 即晶体中的 e 光, 由于泡克尔斯效应, 电场导致的折射率变化, 引起导波相位变化为

$$\Delta\varphi = -\Gamma \frac{\pi}{\lambda} n_e^3 \gamma_{33} \frac{L}{d} V \quad (3-36)$$

式中, Γ 为光场和电场的重叠因子, 一般取值为 0.5~0.7。

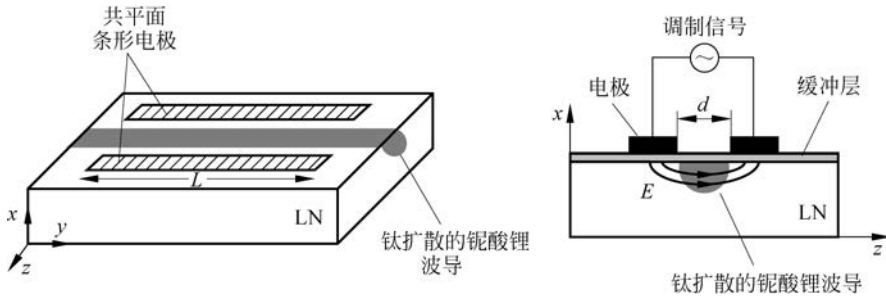


图 3-35 LN 波导光电相位调制器

3. LN 波导马赫-曾德尔调制器(MZM)

1) 器件结构及工作原理

钛扩散的铌酸锂(Ti-LiNbO₃)波导制成的马赫-曾德尔调制器结构如图 3-36 所示, 它由两个 LN 相位调制器, 两个 3dB Y 形分支波导和相应的驱动电极组成。两个相位调制器基于 LN 晶体的电光效应实现光的相位调制, 两个 Y 形分支波导完成分光 and 合光功能, 通过驱动电极提供实现电光效应所需的驱动电压。在理想情况下, 光载波信号通过第一个 Y 形分支波导后分成两束振幅和频率完全相同的光, 分别在两条结构参数完全相同的平行直波导中传输。两条平行直波导和共平面条形电极形成两个理想的相位调制器, 在外加电压的作用下能够改变两个分支中传输光的相位。两列调相波通过第二个 Y 形分支波导干涉耦合, 转换为强度调制波或相位调制波从输出波导输出。

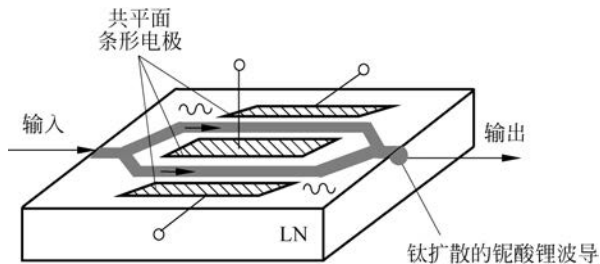


图 3-36 LN 波导光电强度调制器结构示意图

设在第一个分支点的光波表示为 $A(t) = A_0 \exp(j\omega_0 t)$, 经过 Y 形分支波导后, 分成的两路光波为

$$A_1(t) = A_2(t) = \frac{A_0}{\sqrt{2}} \exp(j\omega_0 t) \quad (3-37)$$

两路光波经过第二个 Y 形分支波导汇合后, 在不考虑损耗的情况下, 总的光波表示为

$$\begin{aligned} A'(t) &= \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{A_0}{\sqrt{2}} \{ \exp[j(\omega_0 t + \varphi_1)] + \exp[j(\omega_0 t + \varphi_2)] \} \\ &= A_0 \exp \left[j \left(\omega_0 t + \frac{\varphi_1 + \varphi_2}{2} \right) \right] \cos \left(\frac{\varphi_1 - \varphi_2}{2} \right) \end{aligned} \quad (3-38)$$

式中, φ_1 和 φ_2 分别为两束子波经过上下两个相位调制器之后产生的相移。若 $\varphi_1 = -\varphi_2$, 则式(3-38)变为

$$A'(t) = A_0 \exp(j\omega_0 t) \cos\left(\frac{\varphi_1 - \varphi_2}{2}\right) \quad (3-39)$$

令 $\Delta\varphi' = \varphi_1 - \varphi_2$, 即 $\Delta\varphi' = 2\varphi_1 = -2\varphi_2$, 则输出光的强度可表示为

$$I = I_{\max} \cos^2\left(\frac{\Delta\varphi'}{2}\right) \quad (3-40)$$

式中, $I_{\max}$ 表示输出光强的幅值。由式(3-33)可知相移与调制电压满足线性关系, 那么调制电压和输出光强之间的关系近似线性关系。调制电压为 0 时, 对应最大光强传输点(FULL 点); 调制电压为 V_π 时, 相位差 $\Delta\varphi' = \pi$, 对应最小光强传输点(NULL 点); 当相位差变化在 $\pi/2$ 附近(正交点附近)时, 相位差和相对光强之间的关系近似为线性关系。因此, 对于 LN 波导 MZM, 一般根据不同的调制编码方式来选择不同的偏置点。如 NRZ 编码, 为实现线性调制, 工作电极常常加直流偏置, 使调制器工作在正交点附近; 对于正交相移键控(QPSK), 一般采用直流偏置使 MZM 工作于 NULL 点。

由以上分析可知, 当 MZM 中两个相位调制器的相移符号相反时, MZM 工作于推挽模式(push-pull), 可对光载波进行强度调制; 当 MZM 中两个相位调制器的驱动电压相同时, 相移也相同, 相位差为 0, MZM 工作在双推模式(push-push), 此时 MZM 只对光载波进行相位调制。

2) 波导偏置电极的设计

铌酸锂晶体一般有两个切向, 即 x-cut(或 y-cut)和 z-cut。由于铌酸锂晶体是负单轴晶体, 所以 x-cut 和 y-cut 的铌酸锂晶体各个物理属性基本相同, 在制造电光调制器时区别不大。x-cut 是指铌酸锂晶体在切成 wafer(晶圆)时其上表面(圆面)与 x 轴垂直, 同理, z-cut 是指铌酸锂晶体在切成 wafer 时其上表面(圆面)与 z 轴垂直。因此, 在制作铌酸锂电光调制器时, 为保证由电极激发的电场方向与晶体最大电光张量的方向一致, 电极与波导的位置需根据铌酸锂晶体切向的不同而有所区别。如图 3-37 所示, 在 x-cut 的设计中, 偏置电极置于波导的两侧, 边电极接地, z 轴方向的电场对光波进行调制, 波导传播的模式为 TE 模, 如果其中一臂的折射率增加, 则另一臂折射率减小; 在 z-cut 的设计中, 偏置电极置于波导之上, 此时垂直电场分量起作用, 即电场与 z 轴方向一致, 波导传播模式为 TM 模。相对于

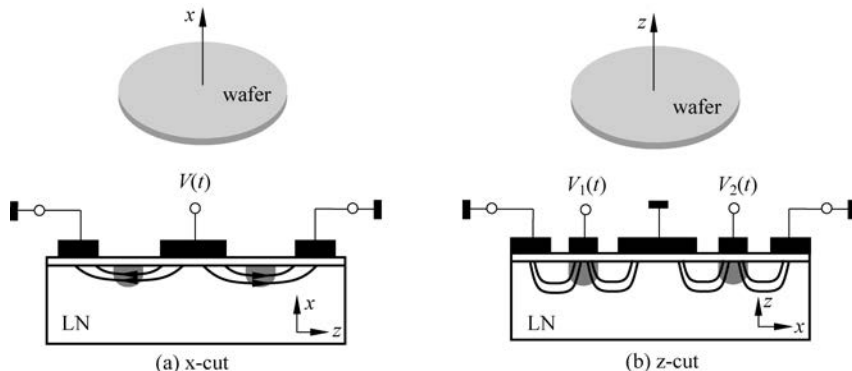


图 3-37 MZM 中波导偏置电极的设计

x-cut 而言, z-cut 的 LN 电光调制器通常有较低的插入损耗和半波电压 V_π , 它的电光转换效率更高。但 x-cut 的 LN 电光调制器的热释电效应非常弱, 传输曲线的漂移能得到很好的抑制, 其稳定性更好。

3) 驱动方式

根据上下两个波导驱动电压的不同设计, MZM 分为单驱动 MZM 和双驱动 MZM。对于 MZM, 若只对其中一个波导施加偏置电场, 则调制器工作在非平衡方式, 会产生很大的啁啾, 因此单驱动的 MZM 通常是对两个波导同时施加偏置电场, 其工作在平衡方式, 如图 3-38 所示。其中, 驱动电压 $V(t) = V_{RF} + V_{DC}$, V_{RF} 为调制电信号, V_{DC} 为直流偏置电压。

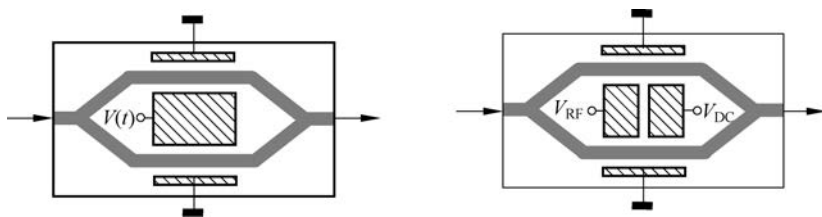


图 3-38 单驱动平衡式 MZM

图 3-39 为 z-cut 的 LN 波导双驱动 MZM 示意图, 通过上偏置电压和下偏置电压的适当设置, 可对光信号进行强度调制和相位调制。

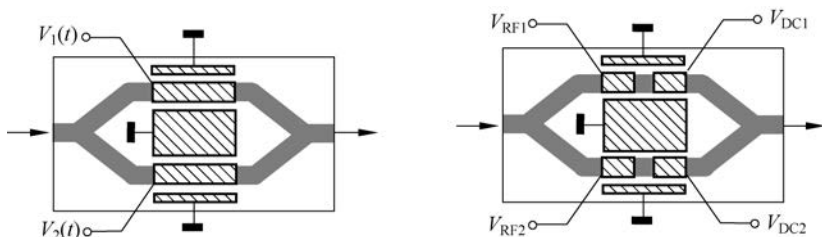


图 3-39 双驱动 MZM

图 3-40 是两种工作于 1550nm 波段的 LN 波导电光强度调制器, 其中法国 IXBULE 公司的 MX-LN-40 电光调制器内部集成了监测用 PD, 引脚 3 和引脚 4 分别接其阴极和阳极。表 3-2 列举了几种 LN 晶体电光强度调制器的主要技术参数。



图 3-40 LN 波导电光强度调制器

表 3-2 几种 LN 波导电光强度调制器的主要技术参数 (@1550nm 波段)

型 号	厂 家	工作带 宽/GHz	插入损 耗/dB	半波电 压/V	消光 比/dB	回波损 耗/dB	DC 偏置 连接器
AX- 0MVS-40 (x-cut)	美国 EOSPACE	>30 (响应 40GHz)	<5	<5 @1GHz <10 @DC 端	>20	>40	SMA
AZ-DV5-40 (z-cut)	美国 EOSPACE	>30 (响应 40GHz)	<4	<4 @1GHz <10 @DC 端	>20	>40	2pin
MX-LN-40 (x-cut)	法国 IXBULE	28~30	3.5~4.5	5~6V@50kHz 7~8V@20GHz 6.5~7@DC 端	20~22	45	2pin

3.5.2 电致吸收调制器

电致吸收调制器(Electro Absorption Modulator,EAM)是一种结型半导体器件,是基于弗朗兹-凯尔迪什效应(Franz-Keldysh Effect)或量子限制斯塔克效应(Quantum-confined Stark Effect,QCSE) 的损耗调制器,工作在调制器件吸收边界波长处。

弗兰兹-凯尔迪什效应是指块状半导体材料在强电场(一般百伏电压)作用下能带倾斜,价带电子通过隧穿跃迁到导带的概率大大增加,有效能隙减小,使得吸收边发生红移。然而,随着外加电场增大,块状半导体材料中的激子很快被离化,使得材料光吸收谱中与之对应的吸收峰随着外加电场增大而很快消失,这也限制了基于弗兰兹-凯尔迪什效应的半导体电致吸收调制器的性能。

在半导体量子阱材料中,当法向电场施加于量子阱层时,电子和空穴的能级发生偏移,导带底能级和价带顶能级之间的能量差变小,同时电子和空穴在外电场的作用下分别向相反方向移动使得激子能量降低,造成激子吸收的斯塔克(Stark)移位,即激子吸收峰向长波长方向移动(红移),这种存在于半导体量子阱材料中的电致吸收效应被称为量子限制斯塔克效应。产生量子限制斯塔克效应的驱动电压较低,而且由于势垒的限制作用,量子阱中的二维激子即使在较高的纵向电场作用下仍不发生分离,可以观察到激子吸收边的红移。因此,基于量子阱半导体材料的电致吸收调制器目前应用最为广泛。

图 3-41 是一种基于量子限制斯塔克效应的电致吸收光调制器结构原理图,它的调制区是一个 PIN 波导,I 区采用多量子阱结构。当给器件施加反向偏压时,MQW 波导的吸收边红移,因此可以通过改变偏压使 MQW 的吸收边界波长发生变化,进而改变光束的通断,实现调制。当调制器无偏压时,光束处于通状态,输出功率最大;随着调制器上偏压的增加,MQW 的吸收边移向长波长,原光束波长处吸收系数增大,调制器为断状态,输出功率最小。改变波导结构和材料掺杂可以使电致吸收调制器用于 1.5μm 波段。

半导体电致吸收调制器虽然在高速和调

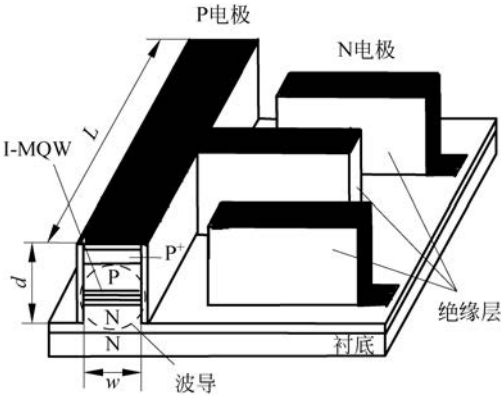


图 3-41 电致吸收调制器结构原理图

啾特性方面不如 LN 波导电光强度调制器,但由于体积小,驱动电压低($\sim 2\text{V}$),易于与激光器、放大器和光检测器等其他光器件集成。电致吸收调制器的综合性能已经能够满足 40Gb/s 及更高速率的调制应用,调制带宽可达 $40\sim 50\text{GHz}$,调制器输出最高达 5.5dBm ,一般约为 1dBm ,消光比可达 15dB 。

3.6 光隔离器与光环形器

前面介绍的光纤连接器、耦合器等无源器件基本上都是互易器件,其输入端和输出端可以互换。然而在很多光通信系统中也需要应用一些非互易的光无源器件,这种器件在光网络中也十分重要。本节主要介绍两种非互易光器件,即光隔离器和光环形器。



视频

3.6.1 光隔离器

光隔离器是一种单端口单向传输器件,其主要功能是限定光只能沿一个方向传输,而阻挡相反方向传输的光波。光隔离器主要用于光通信设备中激光器和光放大器的输出端,阻挡反射光进入这些器件,维持器件稳定工作。在应用中对光隔离器的性能有一定要求,其中插入损耗和隔离度是两个关键参数。插入损耗是指光从正向通过隔离器时的损耗,其值越小越好;隔离度是指光反向通过时产生的损耗,其值越大越好。商用光隔离器典型的插入损耗约为 1dB ,隔离度为 $40\sim 50\text{dB}$ 。

光通信用的隔离器几乎都是基于法拉第磁光效应原理制成的。法拉第磁光效应是指平面偏振光沿着磁场方向入射到磁光材料时,光偏振面将发生旋转,旋转角 θ 可表示为

$$\theta = \rho H L \quad (3-41)$$

式中, ρ 为材料的维德(Verdet)常数;

H 为磁场强度;

L 为磁光晶体的长度。

图 3-42 表示法拉第旋转隔离器的工作原理,起偏器 P 使入射光的垂直偏振分量通过,调整加在法拉第旋转器的磁场强度,使光的偏振面旋转 45° ,然后通过检偏器。反射光返回时,通过法拉第旋光器后其偏振面又一次旋转 45° ,由于偏振面的旋转方向与光的传输方向无关,这样反射光偏振面正好与起偏器的透光轴垂直而被阻挡不能通过,实现了隔离功能。

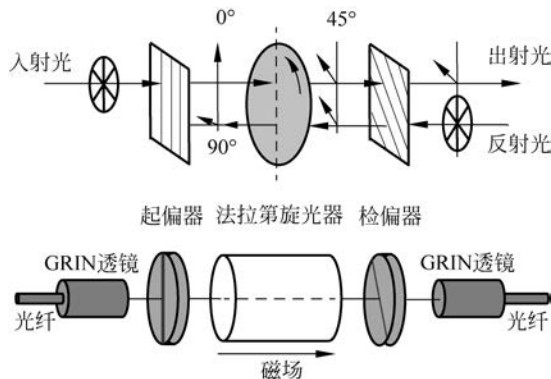


图 3-42 光隔离器工作原理示意图

在光隔离器中所用的磁光晶体对隔离器的性能影响很大,目前国内外广泛采用的磁光材料有钇铁石榴石(YIG- $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$)和用稀土元素钆(Gd)或镱(Yb)部分取代钇(Y)形成晶体。YIG 在 $1.15\sim 5\mu\text{m}$ 波长范围内是透明的,在 $1.3\sim 1.5\mu\text{m}$ 范围内的吸收损耗在 0.1dB/mm 以下。在 $H=1300\text{ Oe}$ (Oersted)的饱和磁场作用下,对于 $1.32\mu\text{m}$ 和 $1.55\mu\text{m}$ 的光波,其法拉第旋转角 θ_F 分别为 $21.5^\circ/\text{mm}$ 和 $15^\circ/\text{mm}$,旋转 45° 所需材料厚度 L 分别为 2.1mm 和 3.0mm 。但因为 YIG 单晶是熔炼生长的,因生长速度慢、价格昂贵而受到限制,而 YIG 薄膜波导器件因性能差而不能被接受。

图 3-43 为一种基于 Gd:YIG 厚膜的光隔离器结构示意图,它采用液相外延(LPE)方法,在 GGG($\text{Gd}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$)基片上生长 Gd:YIG($\text{Gd}_{0.2}\text{Y}_{2.8}\text{Fe}_5\text{O}_{12}$)厚膜,这种光隔离器性能良好且价格低廉,因而受到了重视,并已用于单模光纤通信系统。在这种器件中,方解石厚度为 $500\mu\text{m}$,在基片上的 Gd:YIG 厚膜尺寸为 $2\text{mm}\times 2.3\text{mm}\times 0.2\text{mm}$,自聚焦透镜焦距为 1.1mm ,用钐-钴(Sm-Co)环形永磁铁产生饱和磁场,环的内外直径分别为 3mm 和 5mm ,长 $1.5\mu\text{m}$ 。这种光隔离器在波长 $1.3\mu\text{m}$ 的性能为:隔离度 25dB ,插入损耗 0.8dB (不包括透镜损耗 1dB)。其性能和 YIG 晶体器件相近,饱和磁场只需 100 Oe ,器件尺寸为 $\phi 7\text{mm}\times 7\text{mm}$,价格只有 YIG 晶体器件的 $1/10$ 。

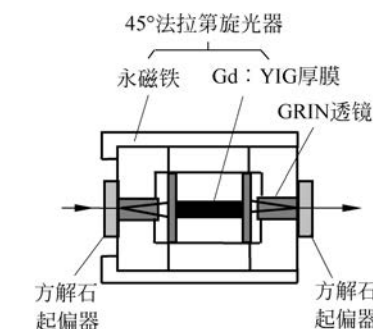


图 3-43 厚膜 Gd:YIG 隔离器的结构

由以上分析可知,上述的光隔离器是针对输入光信号的偏振态中某一特定偏振态(如垂直偏振态)而设计的。这样随着输入偏振光的变化,隔离器的插入损耗和隔离度等特性亦将发生变化,这种特性称为隔离器的偏振相关性。在实际应用中,希望输入偏振态不管如何变化,隔离器的特性仍然维持不变,这种隔离器称为偏振无关隔离器。

图 3-44 是一种偏振无关光隔离器的结构设计。图中任意偏振态 SOP 的输入光信号,首先通过一双折射分束器件后分离成两个互为正交的偏振分量(o 光和 e 光),振动方向平

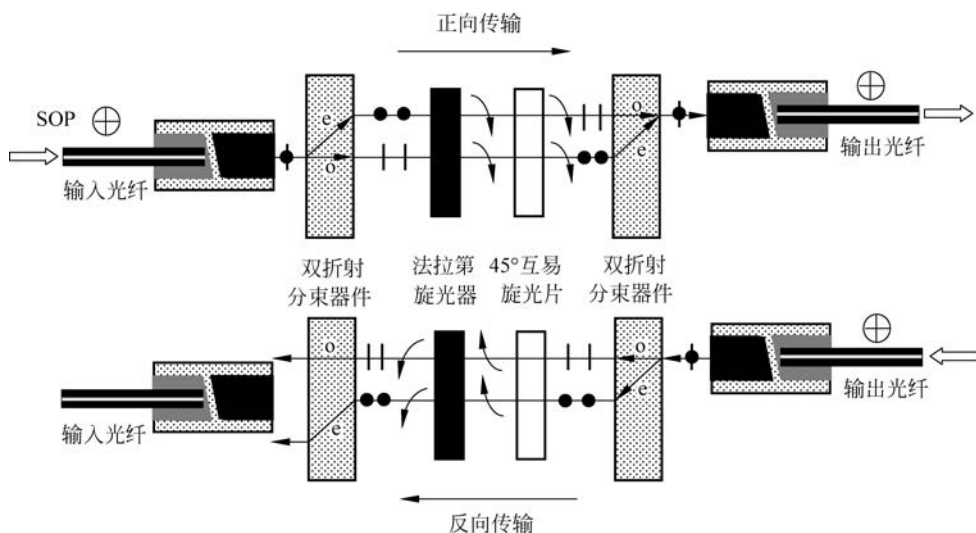


图 3-44 偏振无关光隔离器原理结构图

行于主平面的 o 光直接通过,而振动方向垂直于主平面的 e 光发生偏转,两个分量通过法拉第旋光器后,其偏振态 SOP 都旋转 45° 。法拉第旋光器后接一 45° 互易旋光片(半波片),同样也使光信号偏振态旋转 45° ,因而法拉第旋光器和半波片结合就将使从左到右传输的光信号的偏振态旋转 90° ,即 o 光变成了 e 光,而 e 光变成了 o 光,这样通过输出端的第二个双折射分束器件后合束输出。相反,对于从右到左传输的反射光,半波片和法拉第旋光器彼此的影响相互抵消,反射光的两个偏振分量通过这两个器件后其偏振态 SOP 仍保持不变,不会在输入端重新合束进入输入光纤,从而实现反向隔离功能。



视频

3.6.2 光环形器

光隔离器是一种两端口非互易器件,而光环形器则是一种多端口非互易器件,目前典型的环形器有 3 个或 4 个端口。

图 3-45 是一个三端口光环形器功能示意图及实物图片,端口 1 的输入的光信号只有在端口 2 输出,端口 2 的输入光信号只有在端口 3 输出。在所谓“理想”的环形器中,端口 3 输入的信号只会在端口 1 输出。但是在许多应用中,最后一种状态是不必要的。因此大多数商用环形器都设计成“非理想”状态,即吸收从端口 3 输入的任何信号,方向性一般大于 50dB。

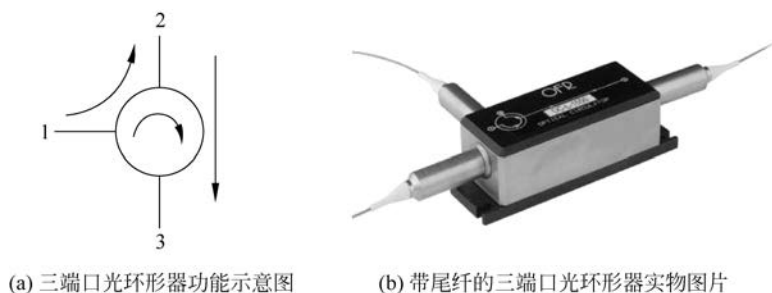


图 3-45 三端口光环形器

图 3-46 为一个三端口偏振无关光环形器的物理结构,其构成及工作原理与偏振无关光隔离器类似,从端口 1 输入的光从端口 2 输出,而从端口 2 输入的光通过双折射分束器件、

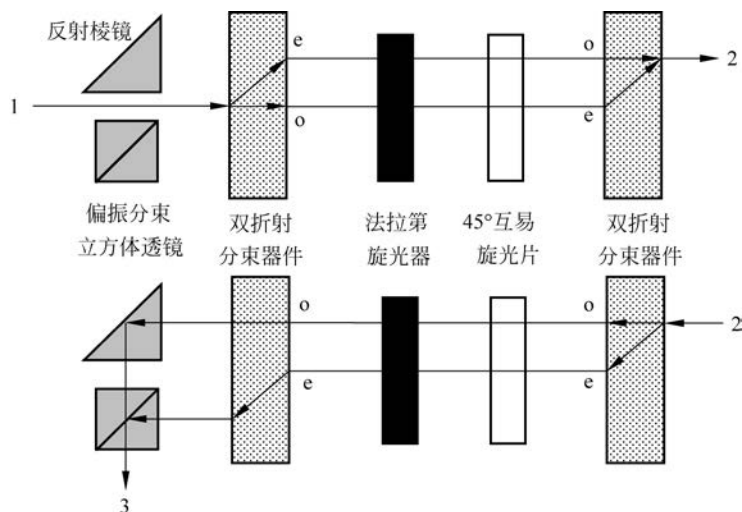


图 3-46 三端口光环形器的物理结构

半波片、法拉第旋光器和另一个双折射分束器件后分为两束,其中一束经反射棱镜反射后通过偏振分束立方体透镜又与另外一束光合束,从端口 3 输出。

3.7 光开关



视频

光开关的功能是实现光通道的通断和转换,它是光网络中的关键器件。随着光网络向着全光网发展,光开关在结构类型和工作性能方面都得到了很大发展。利用光开关构成光交换机可以完成全光网中的光信号路由选择,以实现光信号在光网络上的高速、透明传输和交换。同时光环网的保护倒换也是由光开关来实现的,光开关的响应速度直接决定了光网络的保护倒换时间。光网络的业务配置、波长上下也需要由光开关来完成。总而言之,在光网络中,一切与光通道有关的动作都是由光开关来完成的。

从影响业务动态配置和线路保护倒换角度分析,光网络需要光开关的动作越快越好。光环形自愈网的倒换要求在 50ms 完成,其中包括故障定位时间、信令处理时间、传输时间和光开关动作时间,这样光开关的开关时间就应该小于 10ms。在高速光分组交换网络中,光开关的开关时间必须小于数据包的持续时间,这时所要求的光开关的开关时间为 1ns。在光信号的外调制应用中,光开关的动作时间一定要小于 1 比特的时间带宽,比如要调制一个 10Gb/s(1 比特持续的时间为 100ps)的光信号,光开关的动作时间应该小于 10ps。

除了开关时间或速度外,光开关的性能参数还包括插入损耗、串扰、重复性、消光比、偏振相关损耗以及寿命等。在光网络的不同位置,应该选用不同的光开关。本节介绍光波通信系统中常用的几种不同类型光开关。

3.7.1 机械光开关

1. 传统机械光开关

传统的机械光开关利用机械运动机构移动光纤或光学器件实现信号的开关功能。按照移动的对象不同,机械光开关可以细分为光纤光开关和光学器件光开关。光纤光开关是利用步进电机带动和平移一组输入(或输出)光波导,变换其与一组输出(或输入)光波导的位置,从而将输入光信号耦合到设计的输出光纤中;光学器件光开关是通过移动反射镜或透镜,使输入的光信号聚焦到不同的输出光纤中。

传统的机械光开关的优点是插入损耗、偏振相关损耗和串扰均很低,而且价格低廉;缺点是开关速度较慢(几毫秒),尺寸较大,不易集成。基于这些特点,机械光开关可用于光交叉连接中作为备用光通道的自动切换开关应用,但不适用于前述的其他应用。

2. 微电子机械系统光开关

微电子机械系统(Micro Electro-Mechanical Systems, MEMS)是一种将机械机构和电子器件集成在一个半导体基片上的微小电子机械系统。MEMS 光开关就是基于半导体微细加工技术在半导体(如 Si)基片上制成的微反射镜阵列,反射镜尺寸非常小,通常只有 $140\mu\text{m} \times 150\mu\text{m}$,它通过静电力或电磁力的作用产生升降、旋转或移动,实现改变输入光的传播方向和光通道的开关功能,使任一输入和输出端口相连,以实现光路通断功能。图 3-47 为一可立卧微反射镜 MEMS 光开关的放大显微图,当反射镜立起时,输入光从光纤 1 输出;当反射镜卧倒时,输入光从光纤 2 输出。图 3-48 为采用 MEMS 制作工艺制作的微反射镜阵列的显微图片。

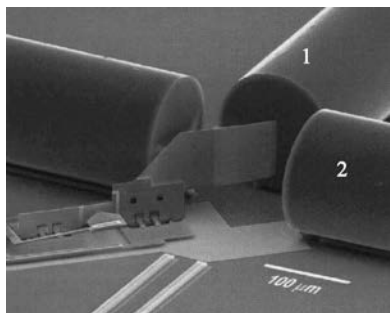


图 3-47 可立卧微反射镜 MEMS 光开关

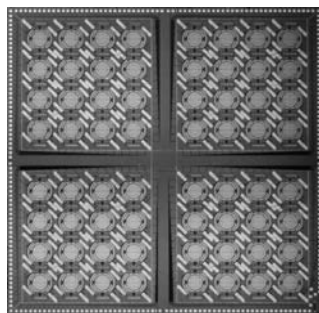


图 3-48 MEMS 微反射镜阵列

利用 MEMS 微反射镜开关阵列,可以构建二维 MEMS 开关阵列光交叉连接结构,图 3-49 分别是采用 16 块微反射镜构成的 4×4 交叉矩阵和 64 块反射镜构成的 8×8 交叉矩阵。这种结构中光交换与波长无关,可实现光信号的透明传输,它的微反射镜片只有“立”和“卧”两种状态,控制电路简单方便,结构稳定性好,适用于构建中小型交换矩阵的光交叉连接设备。如果采用三维 MEMS 光信道交叉连接方案,可以实现大规模的大型光交叉连接结构。目前,MEMS 光开关可以实现 1000×1000 的交叉矩阵,信道数可达 1000 个,在一个交叉节点上的总的集成带宽可达 1Pb/s (1000 个信道,每个信道 1Tb/s)。实验证明,MEMS 光开关的光纤-光纤损耗仅为 0.1dB ,消光比大于 60dB ,开关消耗的功率为 2mW ,开关时间仅为 $5 \sim 10\text{ms}$,开关工作次数可达亿次。由于这种 MEMS 光开关兼有结构紧凑、集成度高和性能优良等特点,使得它成为光网络中光交叉连接设备的核心器件。

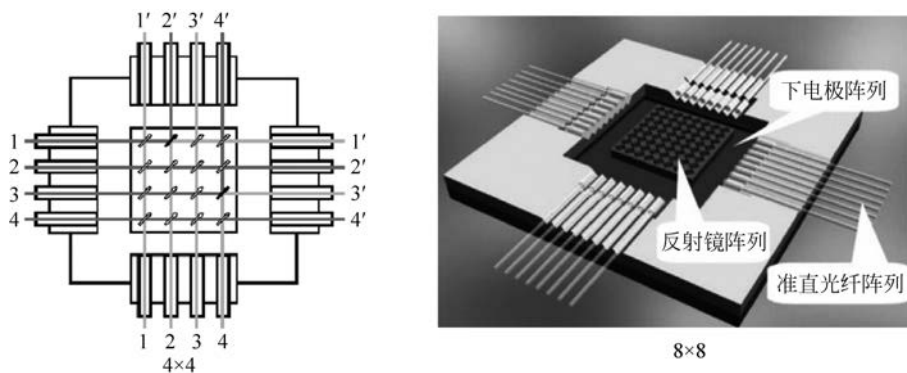


图 3-49 二维 MEMS 光交叉连接

3.7.2 固体波导光开关

1. 电光开关

电光开关是利用电光材料的电光效应制成的光开关。图 3-50 为基于 LN 薄膜波导的 1×1 电光开关结构示意图,它与 3.5 节中介绍的单驱动 MZM 类似,在理想情况下,输入光功率在 C 点平均分配到两个分支波导中传输,在输出端 D 干涉,其输出幅度与两个分支通道的相位差有关。当两个分支的相位差 $\Delta\varphi = 0$ 时光场相长干涉,输出功率最大;当相位差 $\Delta\varphi = \pi$ 时光场相消干涉,输出功率最小,在理想情况下为零。相位差的改变由电信号进行控制。

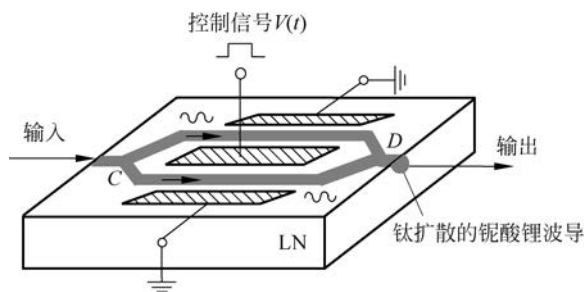


图 3-50 M-Z 干涉仪结构的 1×1 电光开关

LN 波导电光开关的特点是开关速度快(10ps~1ns),可以实现中等程度的集成,可以在单片衬底上集成几个 2×2 开关来构建较大的光开关阵列,其缺点是偏振相关损耗和插损较高,成本也比机械光开关高。

2. 热光开关

热光开关(Thermo-Optic Switch,TOS)是利用材料的折射率随温度而变的热光效应制成的开关器件。图 3-51 表示一种基于 M-Z 干涉仪结构的热光开关,器件尺寸为 30mm×3mm,波导芯和包层的折射率差约 0.3%,波导尺寸为 8μm×8μm,包层厚 50μm,每个干涉臂上具有 Cr 薄膜加热器,其长度为 5mm,宽为 50μm。不加热时,器件处于交叉连接状态;在通电加热 Cr 薄膜(一般需 0.4W)时,波导折射率变化会改变传输光波的相位变化,从而可以将器件切换到平行连接状态。通常只对一个 Cr 薄膜通电加热。图 3-51(c)表示该器件的输出特性和驱动功率的关系。

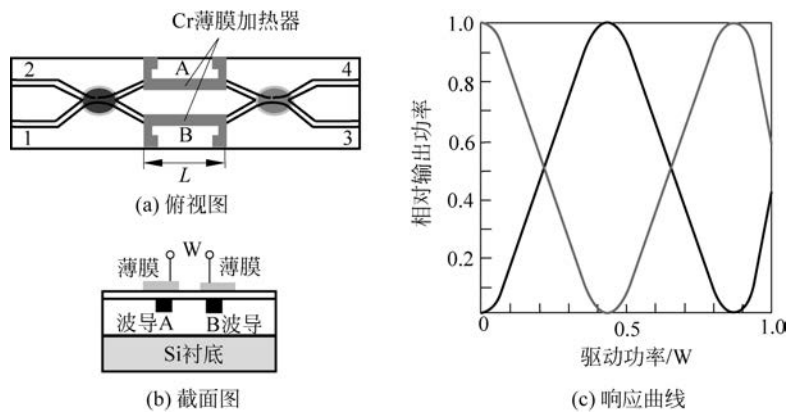


图 3-51 M-Z 干涉仪结构的 2×2 热光开关

热光开关的优点是体积小、成本低,缺点是开关速度慢(毫秒级)、串扰大、消光比低、功耗大。

本章小结

本章介绍了光纤通信系统中常用的无源器件,重点讲述各类器件的基本结构、工作原理、特性参数及其应用。光纤连接器一般采用精密小孔插芯(插针)和套管来实现光纤的精确连接,常见的光纤连接器有 FC 型、ST 型、SC 型、LC 型和 MPO 型等;光耦合器是实现光



材料



材料

信号分路/合路的功能器件,主要有光纤耦合器和平面光波导耦合器;可调谐光滤波器是一种重要的波长(或频率)选择器件,主要有 F-P 滤波器、M-Z 滤波器、声光/电光可调谐滤波器、AWG 滤波器等;波分复用/解复用器是 WDM 系统重要的组成部分,主要有介质薄膜复用/解复用器、M-Z 型复用/解复用器、AWG 复用/解复用器等;铌酸锂电光调制器和电吸收光调制器是光纤通信系统中常用的光调制器;光隔离器和光环形器是光网络中常用的无源非互易器件;光开关是光网络中的关键器件,有机械式光开关和固体波导开关两种。

思考题与习题

3.1 简述 FC 型、ST 型、SC 型、LC 型和 MPO 型光纤连接器的特点及应用。

3.2 如图 3-52 所示,FC/APC 连接器的光纤端面为斜面,请问倾斜角为何是 8° ? 这种连接器采用何种固定/锁紧方式?(提示:普通单模光纤的数值孔径的典型值为 0.13。)

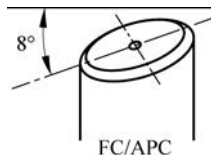


图 3-52 FC/APC 连接器的光纤端面

3.3 2×2 双锥光纤耦合器的一端口的输入功率为 $200 \mu\text{W}$,两个输出端口的输出功率分别为 $90 \mu\text{W}$ 和 $85 \mu\text{W}$,另一输入端口的输出功率为 6.3 nW 。求器件的分光比、插入损耗和串扰。

3.4 简述光纤耦合器和 WDM 分波器的不同。

3.5 使用 F-P 滤波器选择信道间隔 0.1 nm 的 100 个信道,设介质折射率为 1.5,工作波长 $1.55 \mu\text{m}$,计算该滤波器的长度和镜反射率。(提示:注意 $\Delta\lambda$ 与 Δf 间的转换关系。)

3.6 基于 M-Z 干涉仪基本结构设计两种不同类型的功能器件,画出器件示意图并简述其工作原理(可采用 PLC 技术制作一个或多个 M-Z 结构)。

3.7 图 3-29 为一 InP 集成 PIC 芯片结构示意图,它是一个 64 信道的 WDM 信道选择器(数字调谐滤波器)。

(1) 简要叙述这种 WDM 信道选择器的工作原理;

(2) 若输入信号信道间隔为 50 GHz ,则两个 AWG 的自由光谱区(FSR)分别为多少?

3.8 图 3-40 为 LN 波导电光强度调制器。

(1) 简述器件的工作原理;

(2) 器件 RF 和 DC 两个端口分别是什么端口?

(3) 器件为什么进行 DC 偏置?

3.9 相对于电光调制器,简要说明电吸收调制的优势及不足。

3.10 简述光开关的作用及类型。

3.11 讨论平面阵列波导光栅(AWG)的设计思想和方法,列举两个应用实例。

3.12 讨论光纤光栅的原理、类别、主要传输特性及应用。

3.13 举例说明光波分复用器有哪些,并简述其基本特点。