

【教学目的和学习目标】

- (1) 了解光波导元器件的种类
- (2) 掌握光路变换器的结构和原理
- (3) 掌握功率分配器的结构和原理
- (4) 掌握光波导偏振器的结构和原理
- (5) 掌握模分割器和模变换器的结构和原理
- (6) 掌握光波导型透镜的结构和原理
- (7) 了解光波导传感器的种类、结构和原理

导波光学除了研究各种光波导传光理论之外,还研究光波导元器件的制备,最终目的是在制作光波导元器件的基础上制作出集成光路,实现光学系统的小型化、轻型化、稳定化和高性能化。作为集成光路结构中不可缺少的光波导型元器件,可以分为无源器件和有源器件。光波导无源器件是指不受外场控制的器件,这类器件一般只用于光传输;光波导有源器件是指受外场控制的器件,这类器件一般用于光源、调制器和探测器等。离散光学系统中,人们自然而然地就会想到反射镜、透镜、棱镜和光栅等无源器件。但要制作集成光路,就不能再使用这些体型光学器件,而要使用光波导型无源器件。光波导型无源器件全部都要使用平面化的光波导。如果直接将传统的光学器件进行简单的平面化,其结果将会是要么不可能实现,要么实现起来非常困难,即使能够制作出来,性能却不理想。因此,必须设计出与体型器件不同结构以及不同工作原理的器件,以便能够适于制作成光波导型结构。在这些光波导型器件中,通过对光波导特性的有效利用,可以实现在体型器件中无法实现的新功能和特性。本章将主要讲述光路变换器、功率分配器、偏振器、模分割器、波长分波器以及透镜等光波导型元器件的结构和工作原理。

3.1 光路变换器

集成光路一般可以分为混合集成光路和单片集成光路。混合集成光路是将两种以上的衬底材料设法结合在一起,使对于不同的器件的光特性最佳化;而单片集成光路是所有器件使用单个衬底材料。

要在同一块衬底上同时制作出多个光学器件,并实现光路的互通互连,就必不可少地要有能够使光路的方向变化的器件,也就是光路变换器。因此,光路变换器是能够改变光束(光路)方向的器件,主要有光波导棱镜、端面反射镜和弯曲光波导等。本节将讲述它们的结构和工作原理。

3.1.1 光波导棱镜

光波导棱镜如图 3-1 所示。它是在二维光波导上加载棱镜形状的薄膜。其工作原理是遵循光在折射率不同的两种介质的界面上反射和折射定律。值得注意的是,在薄膜棱镜的情况下,所使用的折射率是与模对应的有效折射率。

在体型棱镜的情况下,通常所对应的两种介质是空气和玻璃,由于它们二者的折射率差值比较大,光路偏转角度可以取得比较大的数值;而在薄膜棱镜的情况下,两种介质的折射率差别不大,因此,光路的偏转角就比较小。

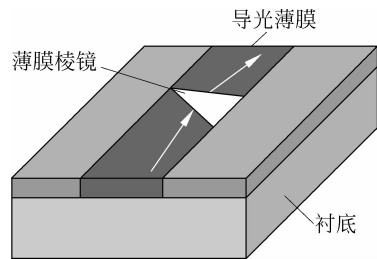


图 3-1 薄膜棱镜产生的光路变换

3.1.2 端面反射镜

端面反射镜如图 3-2 所示。它是将光波导的一端研磨抛光成对于光波导面成严格 90° 的平面。从而,利用光在光波导端面的反射进行光路变换。为了形成很好的反射效果,要求端面与光波导面之间形成精确的 90° ,而且在端面与光波导面处发生全反射。在扩大光路变换角度,又不降低反射效率的情况下,一般需要在研磨过的端面上制作金属或介质全反射膜。对于受空气包围的玻璃光波导,临界角 θ_c 约为 42° ;对于 LiNbO_3 光波导,临界角 θ_c 约为 27° 。

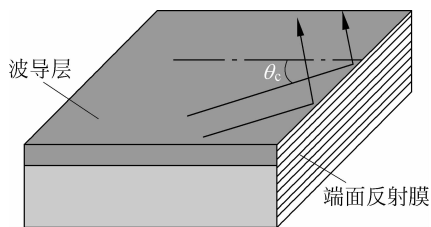


图 3-2 端面反射镜产生的光路变换

端面反射镜制作通常利用光波导层的解理面,也就是在解理面上镀全反射膜后制作而成。

3.1.3 弯曲光波导

弯曲光波导通常是指将两个分离的光波导连接起来的部分,即耦合段。利用弯曲光波导将两个分离的光波导连接起来通常有以下 4 种方式。

1. 直接连接

如图 3-3 所示,两条光波导在 x 方向和 y 方向分别偏移了 l_x 和 l_y ,利用耦合段可以很方便地将这两条光波导直接连接起来,但这时候两个曲折部分的散射损耗必然会变大。

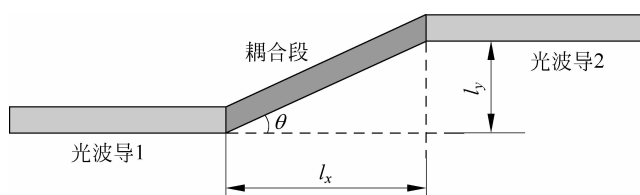


图 3-3 直接连接

要想减小这种散射损耗,必须减小弯曲角度 θ ,因此,在保持 θ 不变的条件下,就一定要增加 l_y 或 l_x 的长度,也就是增加耦合段的长度,这对于制作小尺寸器件是非常不利的。

2. 分段连接

如图 3-4 所示,把直接连接的耦合段部分分割成 $N-1$ 个曲折的直光波导,并使每段直光波导的长度 Δl 具有相等的耦合长度 L_c ,然后将它们连接起来。由于弯曲光波导的分割数的增加而减小了每次弯曲的角度,从而减小了散射损耗。分段连接时在曲折处产生的导模,在传输了 Δl 的长度后,再次耦合进入同相位的导模。这种连接方式虽然工艺上复杂,但却有较好地降低散射损耗的效果。分段连接时的曲折角

$$\Delta\theta = \frac{2\theta}{N-2} \quad (3.1-1)$$

式中 N ——连接点个数, $N \geq 3$;
 θ ——直接连接时的曲折角。

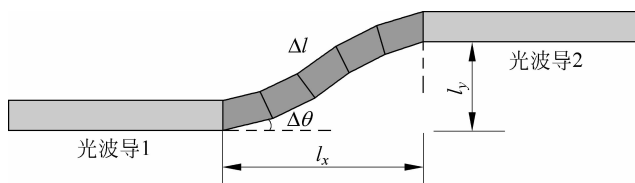


图 3-4 分段连接

3. S形连接

如图 3-5 所示,利用两个曲率半径为 R 的弯曲光波导以 S 形将两个光波导连接。在这种情况下,由于光波导 1、2 与弯曲光波导相切连接,因此连接处非常光滑,损耗很小。但在这两个弯曲光波导的连接处,会因为场分布的不匹配而产生模转换损耗。

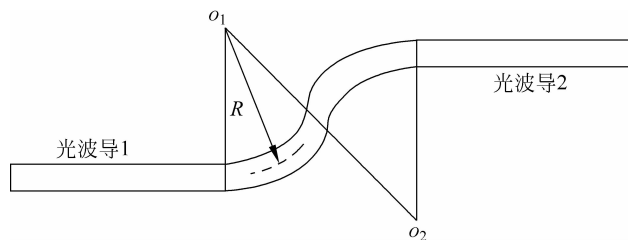


图 3-5 S形连接

4. 曲率渐变连接

如图 3-6 所示,沿着传输轴方向逐渐改变曲率半径将两个光波导连接起来。采用曲率渐变连接可以较好地避免模转换损耗的发生,但在曲线的制作方面存在一定的困难。曲率渐变连接时,弯曲光波导所满足的方程为

$$y = \frac{l_y}{l_x}x + \frac{l_y}{2\pi} \sin 2\pi \left(\frac{x}{l_x} \right) \quad (3.1-2)$$

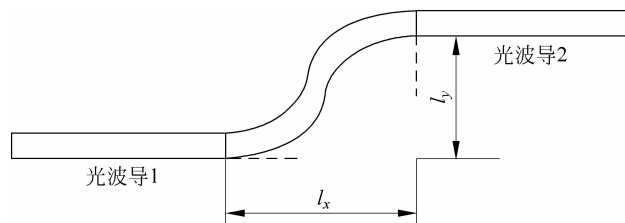


图 3-6 曲率渐变连接

除了棱镜、端面反射镜和弯曲光波导之外,光路变换器还有短程器件和反射光栅等。本节讲述了光路变换器的种类、结构和基本原理,要点归纳于表 3-1 中。

表 3-1 光路变换器

光路变换器	能够改变光束(光路)方向的器件
种类	主要有光波导棱镜、端面反射镜、弯曲光波导(直接连接型、S形连接型、分段连接型、曲率渐变连接型)、短程器件、反射光栅

3.2 功率分配器

把光功率按预定比例分成两个以上输出的器件叫功率分配器。它是光通信系统中将信号从干线光缆分配到各用户时必不可少的器件。功率分配器主要有单模光波导型和多模光波导型。本节将讲述它们的结构和工作原理。

3.2.1 单模光波导型功率分配器

单模光波导型功率分配器包括分支光波导和方向耦合器。

1. 分支光波导

分支光波导有结构对称和非对称两种,如图 3-7 所示。两种结构的分支光波导前部都有一个喇叭形状的光波导,目的是为了防止在分支点产生第二个横模。在输入光波导和输出光波导都为 $4\mu\text{m}$ 宽的单模传输的情况下,如果锥形角 $\theta_c \leq 1/250$,可以将分支点产生第二个横向模的几率控制在 5% 以下。光波导中传输的光在分支点的散射损耗随着分支角 θ_B 的增加而增加,为了使功率分配能够正常工作,必须使分支角 $\theta_B \geq 1/60$ 。因此,在设计用作

功率分配器的分支光波导时,可以选用能够使它正常工作的最小角度 θ_{\min} 。在宽 $4\mu\text{m}$ 的单模对称二分支光波导中,取 $\theta_{\min} \approx 1/60$,可以以大约 1dB 的散射损耗将功率平均分配。

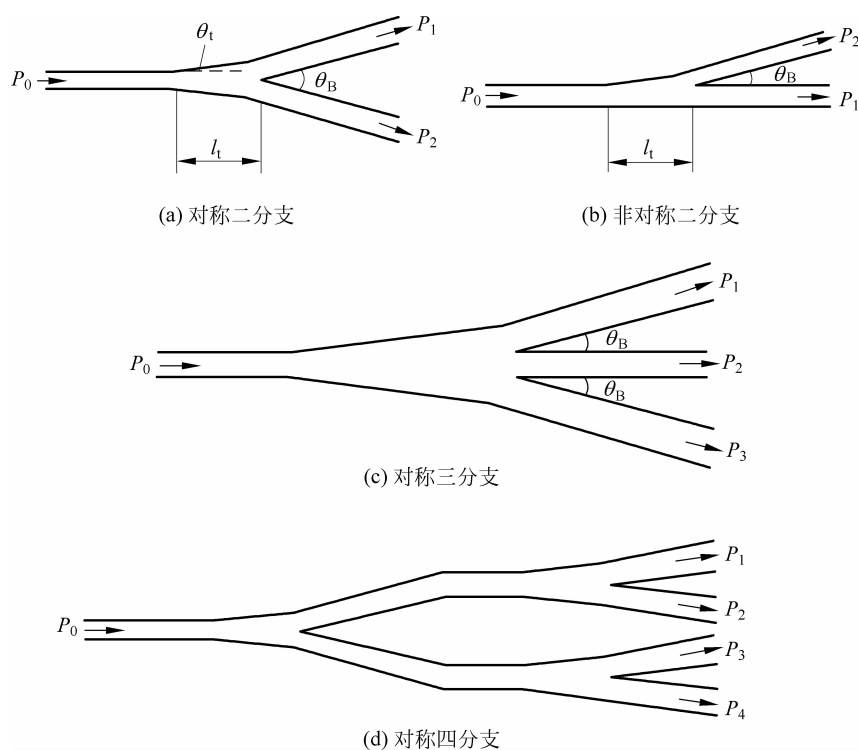


图 3-7 对称和非对称分支光波导

应当注意的是,在非对称结构的分支光波导中的输出分支 2,主要用于功率的监控,通常可以通过改变分支角 θ_B 的方法来调整功率分配比。为了得到更多的功率输出,还可以构造如图 3-7(c)所示的对称三分支光波导。在多分支光波导的情况下,为了能够在平均分配功率的同时又将散射损耗控制在几分贝以下,需要改变各个输出分支的宽度或者它们的折射率。对称二分支光波导是分支光波导的基本结构,将多个二分支光波导串联就可以构成 $1 \times N$ 功率分配器。

由于多模光波导会出现随着入射光的条件不同,分配到各个输出端的功率比也各不相同的问题。因此,为了实现预定的功率分配比,通常使用由单模光波导构成的功率分配器。

2. 方向耦合器

方向耦合器包括双通道方向耦合器、二模光波导耦合器、三光波导方向耦合器和间隙渐变的方向耦合器。

(1) 双通道方向耦合器,如图 3-8 所示。它由两条相隔 $g=2\sim 3\mu\text{m}$ 的平行单模光波导构成。使用方向耦合器,是构成功率分配器的有效方法。

图 3-9 是不同耦合长度和不同照射方式时双通道方向耦合器输出波形示意图。当耦合长度为 L_1 时,激光束直接聚焦在一条光波导上,如图 3-9(b)、(d)所示,输出端光能是平均分配的;激光束只覆盖着一个光波导的部分区域,如图 3-9(a)、(c)所示,输出端光能仍然是

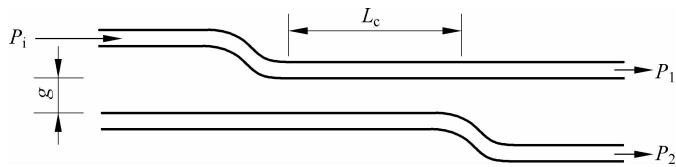


图 3-8 双通道方向耦合器

粗略的均匀。此时方向耦合器称为 3dB 耦合器。

当耦合长度为 L_2 时,激光束直接聚焦在一条光波导上,如图 3-9(b)、(d)所示,输出端光能集中到另一条光波导上;激光束只覆盖着一个光波导的部分区域,如图 3-9(a)、(c)所示,输出端光能微弱相等。此时方向耦合器称为 100%耦合器。

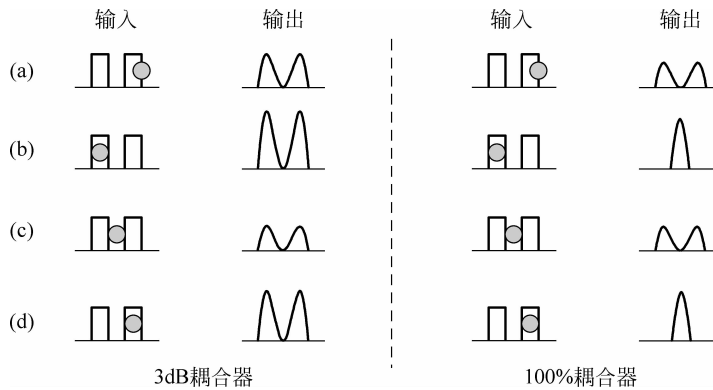


图 3-9 3dB 耦合器和 100% 耦合器输出波形

(2) 二模光波导耦合器,如图 3-10 所示。其耦合部分是可以传输两个模的二模光波导。

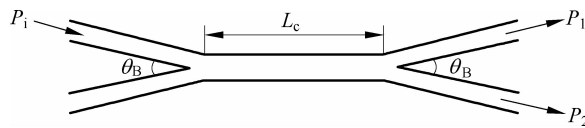


图 3-10 二模光波导耦合器

(3) 平行三光波导方向耦合器,如图 3-11 所示,由 3 个靠得很近的光波导组成。

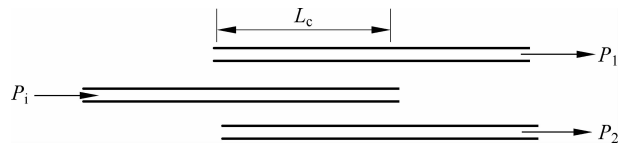


图 3-11 平行三光波导方向耦合器

不管哪一种结构,产生 100% 功率转移的耦合长度 L 取决于奇模与偶模间的传输常数之差。100% 器耦合部分的长度通常为 3dB 耦合器耦合部分长度的 2 倍。但是,在用离子交换光波导和 Ti 热扩散光波导制作方向耦合器的情况下,由于横向扩散和工艺误差等原因,无法实现 $L_2 = 2L_1$ 。为了将方向耦合器制作成 $L_2 = 2L_1$ 的状态,可以利用在图 3-8 中的

一条光波导上靠近输出端的地方,加载电介质的方法,调整 L_c 的长度。用这些方向耦合器构成的器件,由于方向耦合器的性能会受到光波长的强烈影响,因此,它们所适用的光波长带宽充其量也只有 $5\sim 10\text{nm}$ 。这种限制不仅仅针对分配器,而对于所有使用这些方向耦合器构成的器件都适用。

(4) 间隙渐变的**方向耦合器**,如图 3-12 所示。它通过逐渐扩大光波导之间的间隙,可以使光功率从一个光波导转移到另一个光波导中。它与分支光波导有类似的工作特性,但损耗小。这种可变间隙方向的耦合器,从工作原理上来说,类似一个分支光波导,但是在分支光波导中,要想将分支点的光波导光散射损耗控制在 1dB 以下是非常困难的。对于间隙渐变的**方向耦合器**,它以光波导间的最小间隙 g 和间隙扩展角 θ 为其形体特征。在这种间隙渐变的**方向耦合器**中,通过适当选择 g 和 θ 等参数,可以将伴随着功率转移而产生的损耗减小到 $0.2\sim 0.3\text{dB}$ 以下。

图 3-12(b)是用光波导宽度为 $5\mu\text{m}$ 的 K^+ 离子交换单模玻璃光波导制作的 1×3 分支间隙渐变的**方向耦合器**。其中 $g=2\mu\text{m}$, $\theta=0.2^\circ$,它能够以 2% 以内的误差将功率三等分。

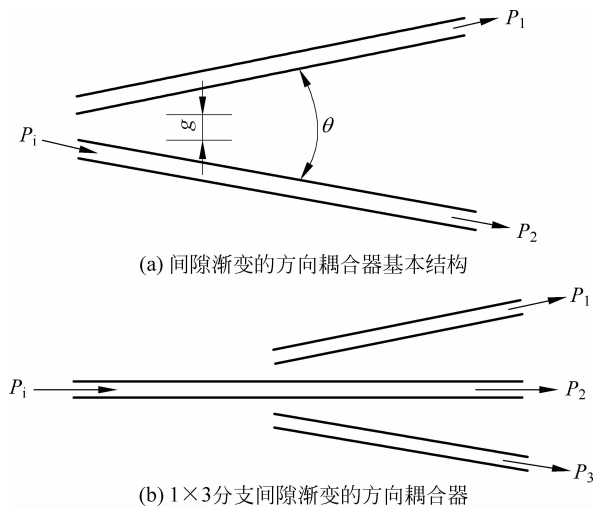


图 3-12 间隙渐变的**方向耦合器

3.2.2 多模光波导型功率分配器

多模光波导型功率分配器有透射型和反射型两种,分别如图 3-13 和图 3-14 所示。功率分配器如果是**由多模光波导构成的,则会随着光的入射条件不同,光波导中所激励起的模的数目以及各个模之间分配的功率比也各不相同,因此必须注意对应于光的入射条件而产生的不同输出端之间功率分配比的变化。为了克服这一问题,要么只在固定的光入射条件下使用这种器件;要么在器件内部设置一个模混合区,使得在任何入射光条件下都会在器件的内部同样激励起几乎所有的模。对于多模功率均分器,出于结构上的原因,采用后面这种在器件内部设置模混合区的方法是比较容易实现的。不管是透射型还是反射型,在任

何一种情况下,从任意一个输入端射入的光功率,都要在经过模混合区以后,平均地分配到所有的输出端。这种分配器通常又叫做星形耦合器。

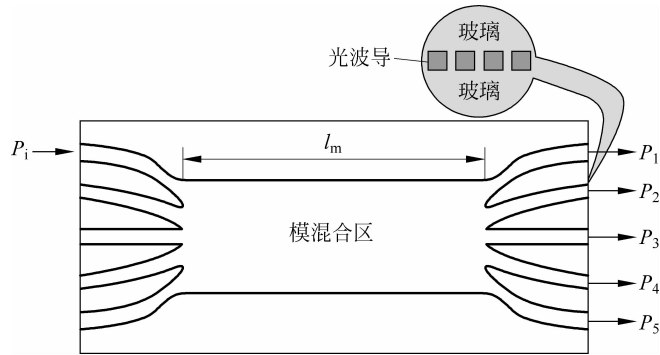


图 3-13 透射型耦合器

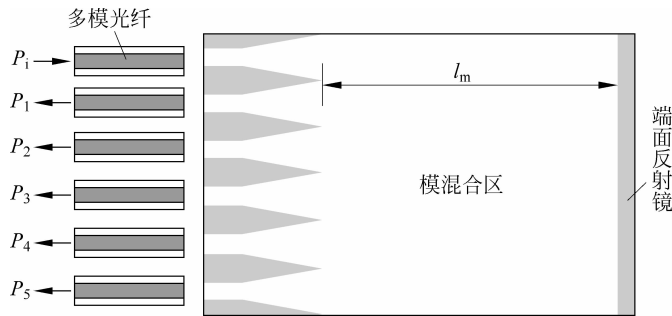


图 3-14 反射型耦合器

星形耦合器的设计要点在于确定模混合区的长度 l_m 。从任意一个入射光波导射入混合区的光都会因为衍射而变宽,在经过侧壁多次来回反射的过程中,其横向光强度分布逐渐变得均匀。因此,只要模混合区的长度达到某个数值以上,就可以将光的功率平均地分配到各个输出光波导中去。

本节讲述了功率分配器的种类、结构和基本原理,要点归纳于表 3-2 中。

表 3-2 功率分配器

功率分配器	把光功率按预定比例分成两个以上输出的器件	
种类	单模光波导型功率分配器	分支光波导、方向耦合器
	多模光波导型功率分配器	透射型耦合器、反射型耦合器

3.3 光波导偏振器

由单模光纤输出的光,入射到光波导型器件时,入射光波一般都是椭圆偏振光。而作为光波导器件一般只对偏振光起作用,因此,对于入射的 TE 模和 TM 模总是要把其中之一除

去或者把两者的传输通道分开。在导波光学中,把除去某种偏振光的器件称为光波导偏振器。集成光路中偏振器主要有金属包层和各向异性晶体。本节将讲述它们的结构和工作原理。

3.3.1 金属包层

在光波导表面上做一个金属包层构成光波导型偏振器,如图 3-15 所示。金属包层可以构成光波导管,当电磁波在光波导管中传输时,会形成管壁电流,该管壁电流形成的磁场对入射电磁波的磁场有抑制作用,从而只允许电场通过。因此,金属包层的光波导型起偏器能吸收 TM 模,而让 TE 模通过。

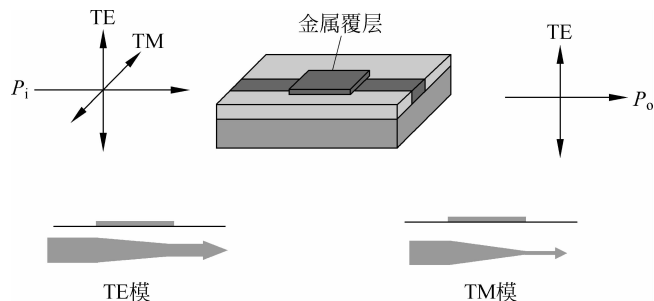


图 3-15 金属包层光波导型偏振器

在用 K^+ 离子交换制作的二维单模玻璃光波导上,如果制作长度为 5mm 的 Al 膜,TE 模的损耗可以控制在 2~3dB,而 TM 模的损耗则可达 20~30dB。经过如此处理,TM 模会被吸收,而 TE 模可以通过。在偏振器中,使用复介电系数虚部大的 Al 比使用 Au 和 Ag 的效果要好。

3.3.2 各向异性晶体

在光波导上加负载各向异性晶体构成偏振器,如图 3-16 所示。其中图 3-16(a)是在离子交换玻璃光波导上,加载与 LiNbO_3 同属于三方晶系的负单轴晶体方解石(CaCO_3)而构成的偏振器。在波长为 $0.633\mu\text{m}$ 时,方解石对应于寻常光和非常光的折射率分别为 $n_o=1.656$, $n_e=1.458$ 。如果光波导材料的折射率用 n 来表示时,且存在着 $n_o > n > n_e$ 的关系。

当方解石的光轴与 TE 模的偏振光方向一致,且 $n_{\text{TE}} > n_e$,则 TE 模能在光波导中传输。TM 模则由于 $n_{\text{TM}} < n_o$,则会随着导波光往方解石中的泄漏和散射而消失。虽然这种类型的偏振器具有要求使用高精度的方解石和对方解石需要进行高精度研磨的缺点,但是却带来了从原理上讲没有透射光损耗、可以获得很高消光比的优点。

如果将光波导衬底也选用各向异性的光学晶体,还可以构成如图 3-16(b)所示的偏振器。 Nb_2O_5 溅射膜折射率 n_e 的大小可以通过改变 Ar 气和 O_2 气的混合比的方法进行调整,在 LiNbO_3 的情况下,也可以满足 $n_o > n > n_e$ 的关系。因此,如果选用 Z 切割 LiNbO_3 ,仍然可以使 TE 模通过, TM 模泄漏。

本节讲述了光波导偏振器的种类、结构和基本原理,要点归纳于表 3-3 中。

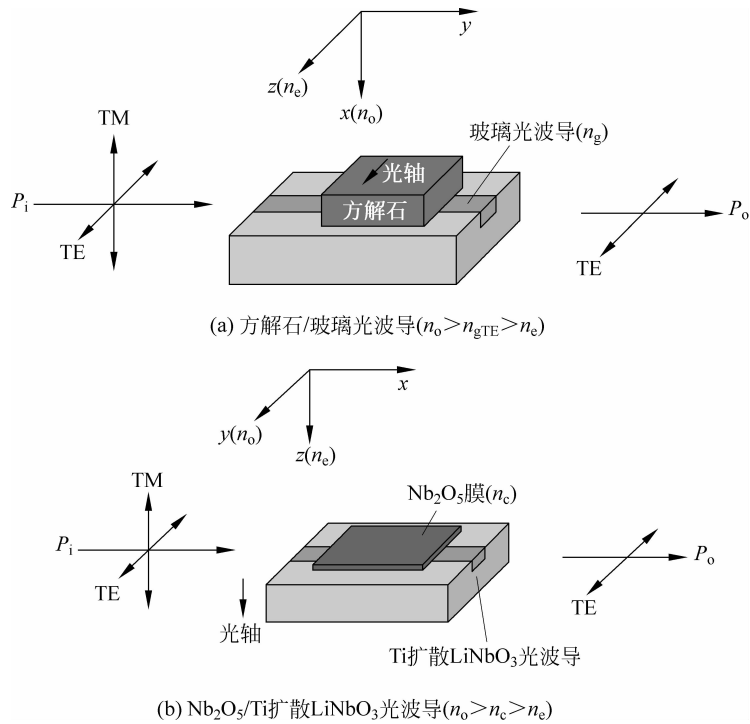


图 3-16 各向异性晶体偏振器

表 3-3 光波导偏振器

光波导偏振器	导波光学中把除去某种偏振光的器件称为光波导偏振器
种类	集成光路中偏振器主要有金属包层和各向异性晶体

3.4 模分割器和模变换器

在导波光学中,把导模之间的传输通道隔离开的器件称为模分割器。模分割器主要有方向耦合器、三层结构分支光波导和 Y 形分支光波导。

3.4.1 方向耦合器型模分割器

方向耦合器型模分割器如图 3-17 所示。如果图中方向耦合器光波导 1 与光波导 2 的导模传输常数分别为 k_1 和 k_2 ,这时通过适当选择低折射率电介质中间层的厚度,可以做到对于 TE 模 $k_1 = k_2$,而对于 TM 模 $|k_1 - k_2| \gg K$,以达到模分离的目的。这里的 K 是两光波导的耦合系数。耦合部分的长度如果取为完全耦合长度 L ,那么 TM 模就可以从光波导 1 中取出,TE 模就可以从光波导 2 中取出。