

【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

【本章引言】

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技术和工艺,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,从而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,性能也不理想。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新特性。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。

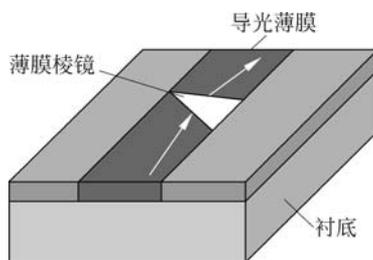


图 3-1 光波导棱镜(薄膜棱镜产生的光路变换)示意图

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° 。

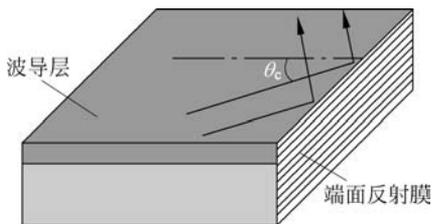


图 3-2 端面反射镜产生的光路变换示意图

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。

要想减小这种散射损耗,必须减小弯曲角度 θ ,因此,在保持 l_y 不变的条件下减小 θ ,就一定要增加 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

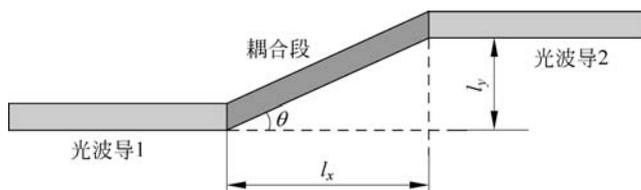


图 3-3 直接连接示意图

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 称为连接点个数, $N \geq 3$; θ 称为直接连接时的曲折角。

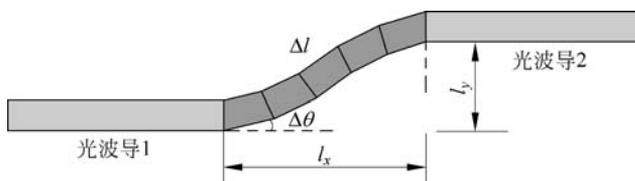


图 3-4 分段连接示意图

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。

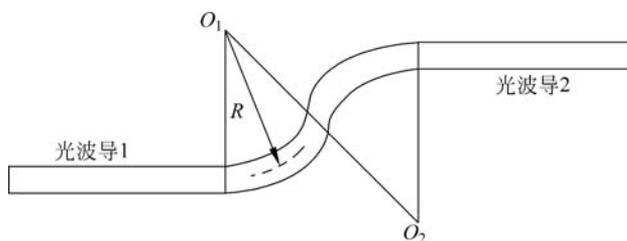


图 3-5 S形连接示意图

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

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

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。

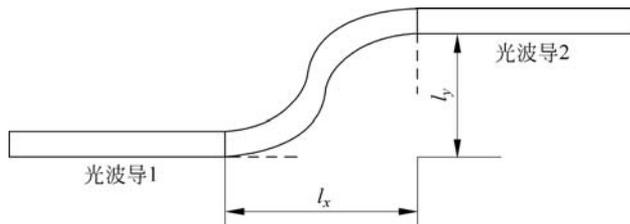


图 3-6 曲率渐变连接示意图

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、分段连接型、S形连接型、曲率渐变连接型)、短程器件、反射光栅等

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作功率分配器。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 $\theta_t \leq 1/250$,可以将分支点产生第二个横向模的概率控制在 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。

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造 $1 \times N$ 功率分配器,如图 3-7(d)所示。

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

方向耦合器主要是通过倏逝波的穿透作用,实现光从一个光波导进入另一个光波导中。

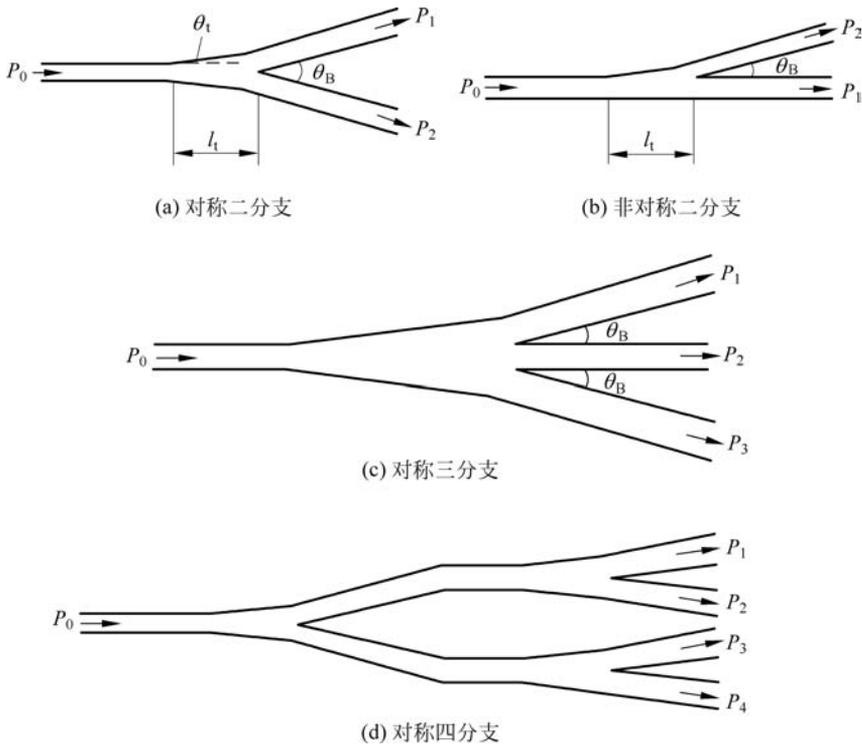


图 3-7 对称和非对称分支光波导示意图

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。

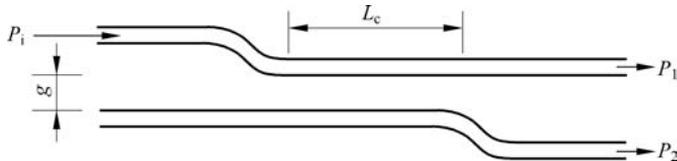


图 3-8 双通道方向耦合器示意图

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)、图 3-9(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)、图 3-9(c)所示,输出端
光能仍然是粗略的均匀。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)、图 3-9(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)、
图 3-9(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。

(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。二模光波导耦合器通常做成对称形状,即输入端和输出端一样。当两个模式混合在一

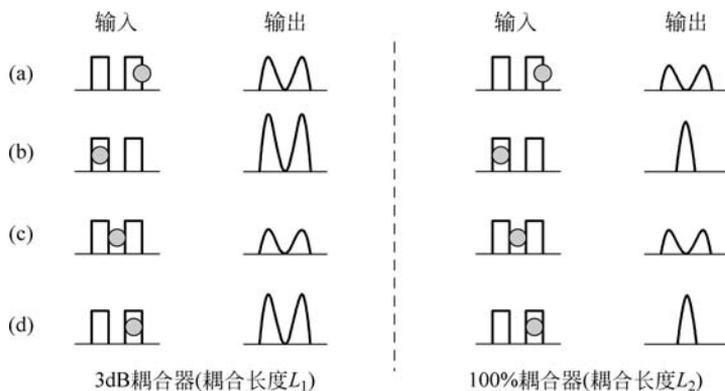


图 3-9 3dB 耦合器和 100% 耦合器输出波形示意图

起的光从输入端进入二模光波导耦合器,经过耦合部分 L_c 之后,将分别从两个端口输出,从而对入射光功率进行分配。

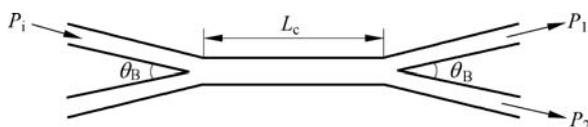


图 3-10 二模光波导耦合器示意图

(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。光通过中间的光波导进入平行三光波导方向耦合器,经过耦合段 L_c 之后将会进入上下光波导中。从上下两个光波导输出的光的功率 P_1 和 P_2 可能相等,也可能不相等。

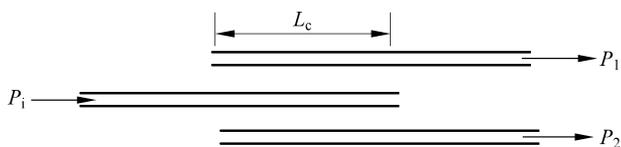


图 3-11 平行三光波导方向耦合器示意图

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% 耦合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也只有 5~10nm。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 $g=2\mu\text{m}$, $\theta=0.2^\circ$,它能够以小于 2% 的误差将功率三等分。

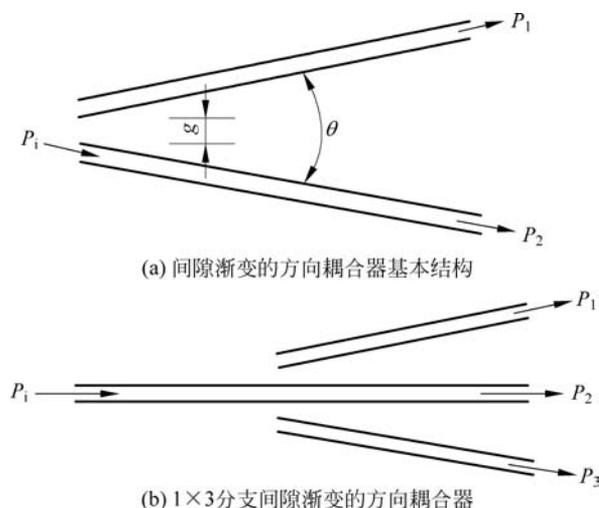


图 3-12 间隙渐变的方向耦合器示意图

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,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,采用后面这一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作星形耦合器。

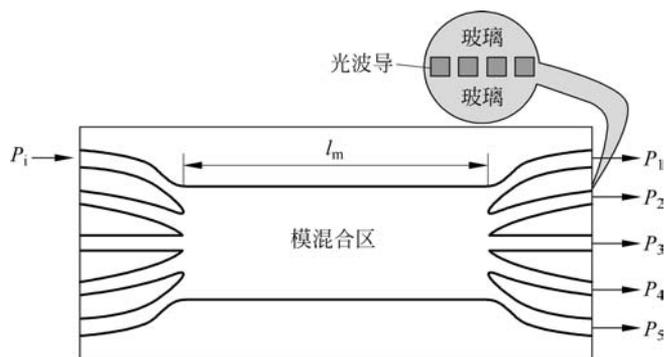


图 3-13 透射型耦合器示意图

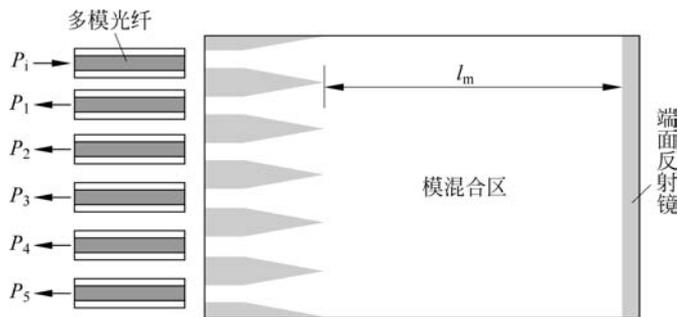


图 3-14 反射型耦合器示意图

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。

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 金属覆层偏振器

在光波导表面上做一个金属覆层构成光波导型偏振器,如图 3-15 所示。金属覆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,金属覆层的光波导型起偏器能吸收 TM 模,而让 TE 模通过。

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 模就会被吸收,而 TE 模则可以通过。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 各向异性晶体偏振器

在光波导上加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

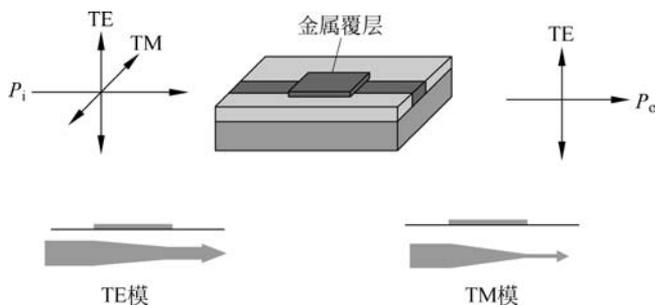


图 3-15 金属覆层光波导型偏振器示意图

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) 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。

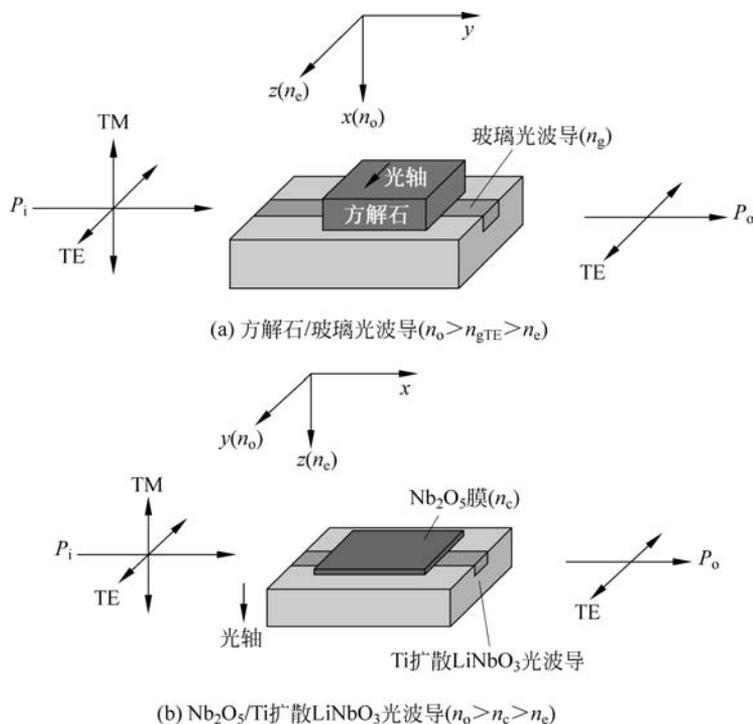


图 3-16 各向异性晶体偏振器示意图

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。

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覆层和各向异性晶体

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。模变换器是将一种模变换成另一种模的器件。本节将讲述模分割器和模变换器的结构和原理。

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。

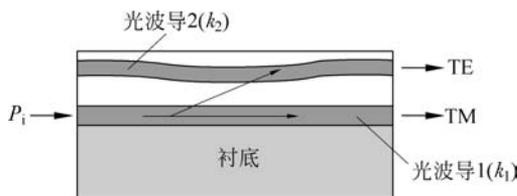


图 3-17 方向耦合器型模分割器示意图

3.4.2 三层结构分支光波导

三层结构分支光波导如图 3-18 所示。图中臂 2 和臂 3 两个光波导的折射率以及宽度都相等,即 $n_2 = n_3, d_2 = d_3$ 。臂 2 的上层为空气,下层为 SiO_2 ; 臂 3 的下层为石英玻璃,上层为 SiO_2 。

根据模式本征方程 $k_x h = m\pi + \tan\left(\frac{p}{k_x}\right) + \tan\left(\frac{q}{k_x}\right)$,可以得到

$$k_x d_2 = m\pi + \tan\left(\frac{p_2}{k_x}\right) + \tan\left(\frac{q_2}{k_x}\right) \quad (3.4-1)$$

和

$$k_x d_3 = m\pi + \tan\left(\frac{p_3}{k_x}\right) + \tan\left(\frac{q_3}{k_x}\right) \quad (3.4-2)$$

因为 $d_2 = d_3, p_2 = q_3$,所以 $q_2 = p_3$,也就是对于 m 阶导模有

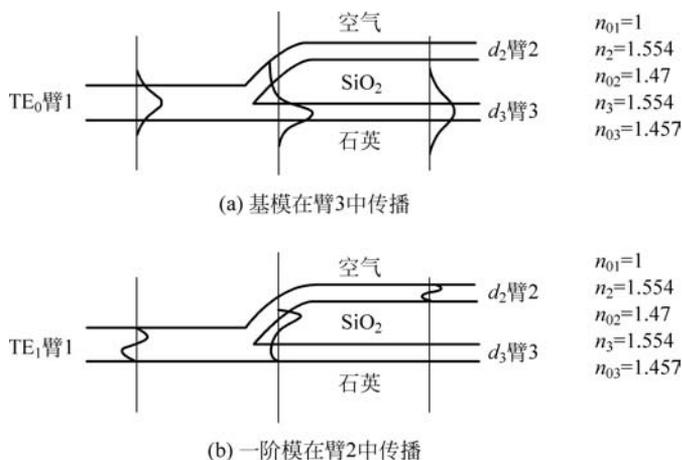


图 3-18 三层结构分支光波导示意图

$$\sqrt{k_{2z}^2 - (k_0 n_{01})^2} = \sqrt{k_{3z}^2 - (k_0 n_{03})^2} \quad (3.4-3)$$

由于 $n_{01} < n_{03}$, 因此得到

$$k_{2z} < k_{3z} \quad (3.4-4)$$

也就是说, 臂 2 中的传播常数小于臂 3 中的传播常数。因为低阶模会选择传播常数大的臂进行传播, 而高阶模会选择传播常数小的臂进行传播。因此, 当在臂 1 端输入基模和一阶模时, 基模会沿着臂 3 传播, 一阶模会沿着臂 2 传播。

3.4.3 Y 形分支光波导模分割器

Y 形分支光波导模分割器如图 3-19 所示。图 3-19(a)、图 3-19(b) 是 Y 形分支光波导模分割器的俯视图和截面图。

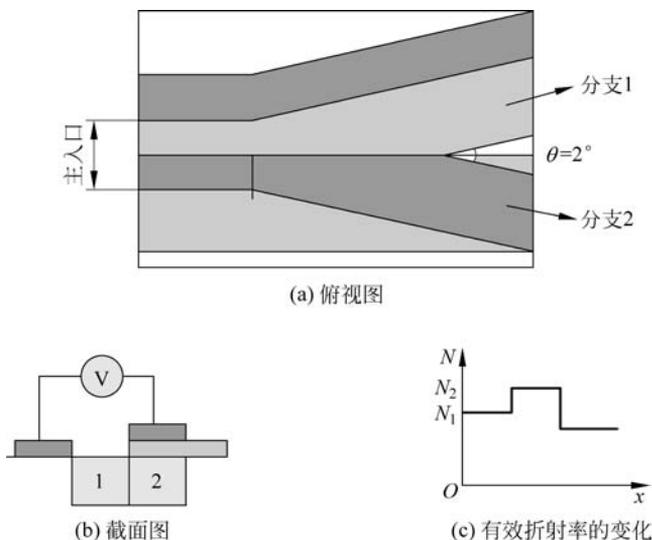


图 3-19 Y 形分支光波导模分割器示意图

其原理是：在主光波导的一半加载介质膜(区域 2)，在其上制作电极；另一半区域(区域 1)不被包覆，这样 $N_2 > N_1$ 就会形成沟道光波导。有效折射率分布如图 3-19(c) 所示。由于 $N_2 > N_1$ ，在不加电压时，TE 模和 TM 模都导入主光波导区域 2，随后馈入分支 2 中，当施加电压时，TE 模对电压敏感，克服介质包覆层对 TE 模有效折射率的增加，而 TM 模对电压不敏感，从而把 TE 模和 TM 模分别约束在区域 1 和区域 2 中。

3.4.4 模变换器

模变换器通常是将基模变换成其他高阶模的器件，如图 3-20 所示。它的基本结构是三层结构的分支光波导，当基模由臂 1 进入后，应当进入臂 3 中，但是，由于臂 2 的末端部分加厚，使得基模得以扩展，从而形成一阶模。

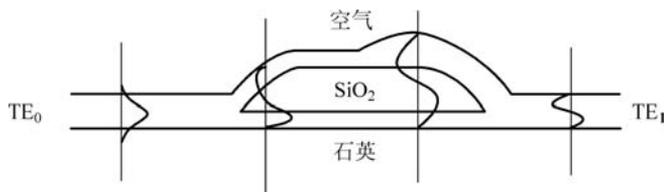


图 3-20 分支光波导模变换器示意图

本节讲述了模分割器和模变换器的种类、结构和基本原理，要点归纳于表 3-4 中。

表 3-4 模分割器和模变换器

模分割器	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
模分割器的种类	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
模变换器	模变换器是将基模变换成其他高阶模的器件

3.5 光波导型透镜

光波导型透镜与普通透镜一样，都具有成像和傅里叶变换功能。在成像中包含了会聚、发散和准直功能。在傅里叶变换中包含了传递函数和信息代换。光波导型透镜是对传输于二维光波导内的导波光发挥这些透镜功能的器件，特别是在构成用于信号处理的集成光路时，它是一种极其重要的器件。常用的光波导型透镜主要有模折射率透镜、短程透镜和菲涅耳型透镜。本节将讲述它们的结构和原理。

3.5.1 模折射率透镜

在厚度均匀的二维光波导上制作有效折射率不同的区域，若形状合适，便可起到透镜作用，这种典型的透镜称为模折射率透镜，如图 3-21 所示。图中 N_L 表示透镜区域的有效折射率， N_S 表示其周围介质的有效折射率。

由图 3-21 可知，从 P 点到 F 点的光程等于 P' 点到 F 点的光程，因此有 $N_S \overline{PF} = N_L \overline{P'O} + N_S \overline{OF}$ ，可得

$$N_S \sqrt{x^2 + (f+z)^2} = N_L z + N_S f \quad (3.5-1)$$

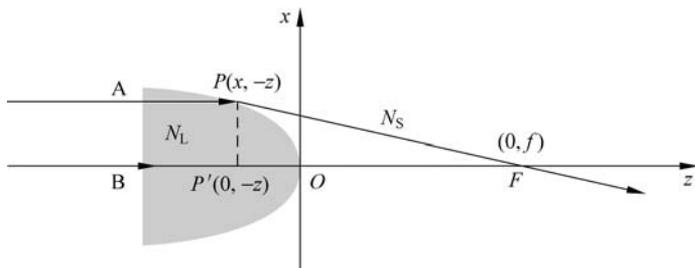


图 3-21 模折射率透镜示意图

上式两边平方得

$$N_S^2(x^2 + f^2 + 2fz + z^2) = N_L^2z^2 + 2N_LN_Sfz + N_S^2f^2 \quad (3.5-2)$$

即

$$N_S^2x^2 + N_S^2f^2 + 2N_S^2fz + N_S^2z^2 = N_L^2z^2 + 2N_LN_Sfz + N_S^2f^2 \quad (3.5-3)$$

整理可得

$$N_S^2x^2 = 2(N_LN_S - N_S^2)fz + (N_L^2 - N_S^2)z^2 \quad (3.5-4)$$

则

$$x^2 = 2\left(\frac{N_L}{N_S} - 1\right)fz + \left(\frac{N_L^2}{N_S^2} - 1\right)z^2 \quad (3.5-5)$$

讨论：①当 $N_L > N_S$ 时，曲线方程为双曲线的一部分；② $N_L < N_S$ 时，曲线方程则为椭圆弧；③ $f > 0$ 为会聚透镜， $f < 0$ 为发散透镜。

模折射率透镜的优点在于设计简单，制作容易；缺点在于边界处产生光散射及模变换。通常 N_L 和 N_S 相差很小，也因此难以得到 f 小的透镜。

在通常的 $N_L > N_S$ 情况下，再把它做成往左右两侧凸出的形状，那么它就被做成了凸透镜，可以起到聚光作用。但是即使是倒过来，在 $N_L < N_S$ 的情况下，只要把它做成两侧凹进的形状，它也相当于一个凸透镜，也可以起到聚光作用。根据需要可以设计出其他模折射率透镜，如图 3-22 所示。

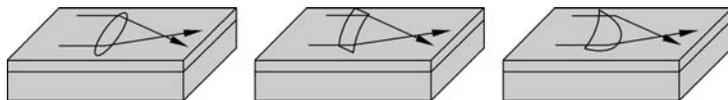


图 3-22 其他模折射率透镜示意图



费马简介

3.5.2 短程透镜

如果使二维光波导表面的局部区域凹陷，即去掉原来光波导面的部分区域，将其做成曲面，那么穿过该区域的导波光线就会遵从费马原理，改变其行进的方向描绘出一个曲线轨迹。只要曲面的形状适当，就会起到一个透镜的作用，如图 3-23 所示。

这是一种只用光波导就可以实现透镜功能的透镜，其光线沿着曲面的最短路程行进，所以被称为短程透镜。令曲面方程为 $z = g(\rho)$ ，曲面的旋转对称半径为 R ，从曲面中心点沿子午线到考查点的弧长为 s ，光波导的模折射率为 N ，则有

$$NdL = N(ds^2 + \rho^2d\varphi^2)^{1/2} = N(d\rho^2 + dz^2 + \rho^2d\varphi^2)^{1/2} \quad (3.5-6)$$

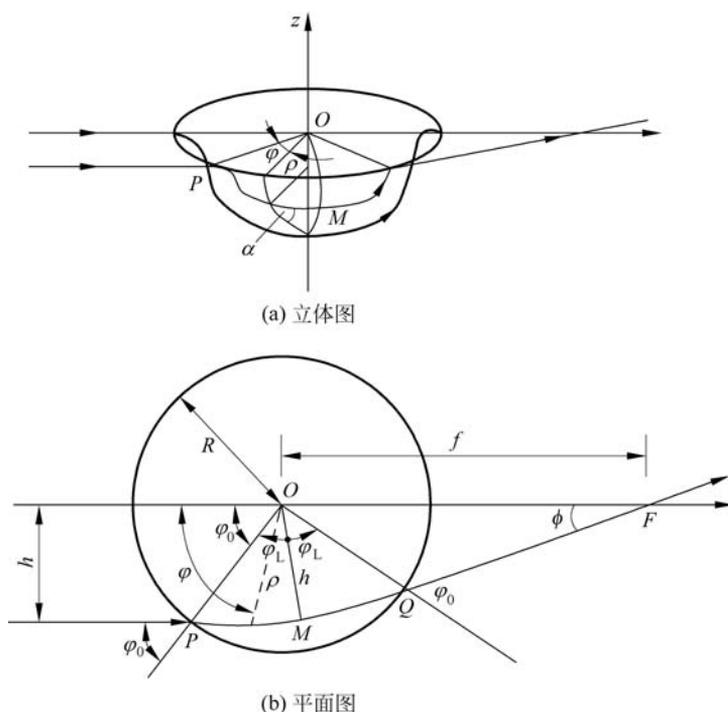


图 3-23 短程透镜示意图

根据费马原理 $\int_A^B N dL = \text{恒定值}$, 则有 $\delta \int_A^B N dL = 0$, 即

$$\delta \int_A^B N dL = \delta \int_A^B [1 + (dz/d\rho)^2 + \rho^2 (d\varphi/d\rho)^2]^{1/2} d\rho = 0 \quad (3.5-7)$$

由此欧拉(Euler)微分方程可以得到

$$\frac{\rho^2 (d\varphi/d\rho)}{[1 + g'^2(\rho) + \rho^2 (d\varphi/d\rho)^2]^{1/2}} = \rho^2 \frac{d\varphi}{dL} = \rho \cdot \sin\alpha = h \quad (3.5-8)$$

式中, α 是光线与子午线所成的角; h 是随光线而不同的常数。

光线对于 M 中心对称, 在 M 点, $\alpha = \pi/2$, 因此, $\rho = h$ 。在入射点 $\rho = R$, $\alpha = \varphi_0$, 因此, $h = R \sin\varphi_0$, 即 h 等于入射光线到光轴的距离。由式(3.5-8)解出

$$\frac{d\varphi}{d\rho} = \pm \frac{h [1 + g'^2(\rho)]^{1/2}}{\rho(\rho - h^2)^{1/2}} \quad (3.5-9)$$

式中, 在 MQ 弧上取+, 在 PM 弧上取-。将式(3.5-9)积分, 得到透镜内光线的中心角

$$2\varphi_L = 2 \int_h^R \frac{h [1 + g'^2(\rho)]^{1/2}}{\rho(\rho - h^2)^{1/2}} d\rho \quad (3.5-10)$$

利用式(3.5-10)可进行光线追迹。透镜焦距

$$f = \frac{h}{\sin\phi} \quad (3.5-11)$$

在透镜曲面为球面一部分的情况下, 假设从球面中心沿着透镜直径 $2R$ 观察曲面的张角为 2θ , 那么式(3.5-10)的积分可以解析, 得到

$$2\varphi_L = \pi - 2\arctan(\cos\theta\cos\varphi_0) \quad (3.5-12)$$

从式(3.5-11)和式(3.5-12)可以得到与近轴光线($h \rightarrow 0$)相对应的焦距为

$$f = f(h \rightarrow 0) = R / [2(1 - \cos\theta)] \quad (3.5-13)$$

但是,在 $|h| > 0$ 的情况下, $f(h)$ 与上式中 f 是不一致的,也就是说,球面短程透镜一般情况下都会有比较大的球面像差。为了除去或者减小这种球面像差,可以对球面透镜进行像差修正或采用非球面透镜。采用像差修正措施,包括在球面透镜的外围增加一个与之相连接的圆环面,并且选择适当的曲率;或者使透镜内的有效折射率大于周边有效折射率;或者采用非球面透镜措施,是通过适当选择旋转椭圆球面的椭圆率,使得立体像差得以消除。与在球面透镜的外围增加一个与之相连接的圆环面的措施相比,一般情况下,只要能够求出最佳的非球形面,就将获得更为有效的无像差效果。

短程透镜的制作是在将衬底加工成曲面后,再在其表面形成光波导层而构成的。在玻璃衬底的情况下,制作凹面短程透镜的最简便方法是利用玻璃的热软化法,把衬底放在一个有圆柱形贯通孔的架子上,将衬底玻璃一边加热一边用真空吸引法往贯通孔内吸,就可以得到具有平滑界面而且看上去几乎为球面的凹面。为了制作无像差透镜,需要进行非球面加工,要想得到接近于衍射临界值的聚光特性,加工精度需要达到 $1\mu\text{m}$ 以下。为此可以采用超声波冲击加工法、金刚石研磨法和金刚石切削研磨法。前两种加工方法使用的是非球面形状的工具;最后一种方法是使衬底旋转,经金刚石车刀切削后再进行研磨。这些技术基本上都已经全部定型,采用这些技术在玻璃衬底和 LiNbO_3 衬底上,制作出了具有几乎接近于衍射临界值聚光特性的透镜。但是需要使用计算机控制的高精度特殊设备进行长时间的加工,不利于大批量生产,所以从现状来看,高性能短程透镜的缺点使其很难成为一种经济型的透镜。

3.5.3 菲涅耳透镜

菲涅耳透镜是利用光在周期性结构中的衍射现象制成的透镜,如图 3-24 所示。

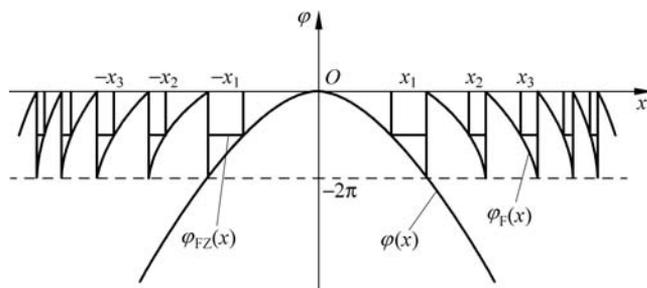


图 3-24 利用菲涅耳透镜进行的位相调制

图中, $\varphi(x)$ 为输入输出光的位相差。 $\varphi_F(x)$ 是菲涅耳透镜的位相调制, $\varphi_{FZ}(x)$ 是菲涅耳透镜的局部位相调制。对于菲涅耳波带片,经不同环带的平行光会会聚到同一点。在二维光波导内沿着 z 方向传输的平行光与聚焦到 $(0, f)$ 点的光,在 x 轴上的相位差为

$$\varphi(x) = k_0 N (f - \sqrt{x^2 + f^2}) \approx - (k_0 n / 2f) x^2 \quad (3.5-14)$$

式中, N 为有效折射率。菲涅耳透镜就是对上述平行光束进行调制的焦距为 f 的透镜。菲涅耳透镜以 2π 的相位间隔,将 $\varphi(x)$ 进行分割调制,使得在 x 轴附近 $\varphi(x)$ 的等效相位调

制为

$$\varphi_{F(x)} = \varphi(x) + 2m\pi = -(k_0 n / 2f)x^2 + 2m\pi \quad m = 0, 1, 2, \dots \quad (3.5-15)$$

式中, $x_m < |x| < x_{m+1}$, $2\pi \leq \varphi_F(x) \leq 0$ 。菲涅耳透镜的局部界面为

$$x_m = \sqrt{2m\lambda f / N} \quad (3.5-16)$$

如果令透镜的厚度为 L , 透镜区域的有效折射率与周围区域的有效折射率差为 ΔN , 则薄透镜情况下, 位相移动正比于 $L\Delta N$, 即 $\varphi_F(x) = k\Delta NL$ 。合适的折射率分布和厚度分布, 就可以制成菲涅耳透镜。

折射率分布: $L = \text{常数}$, 如图 3-25 所示。

$$\Delta N(x) = \Delta N_{\max} \left[\frac{\varphi_F(x)}{2\pi} + 1 \right] \quad (3.5-17)$$

厚度分布: $\Delta N = \text{常数}$, 如图 3-26 所示。

$$L(x) = L_{\max} \left[\frac{\varphi_F(x)}{2\pi} + 1 \right] \quad (3.5-18)$$

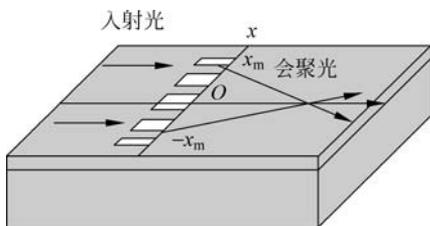


图 3-25 折射率分布型示意图

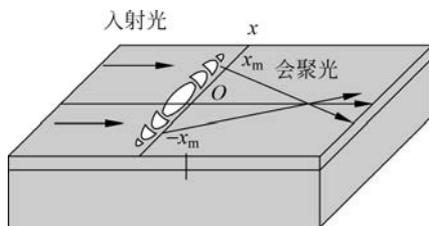


图 3-26 厚度分布型示意图

由于各个菲涅耳透镜的局部之间的相位差为 2π 的条件是

$$k_0 \Delta N L_{\max} = 2\pi; \quad k_0 \Delta N_{\max} L = 2\pi \quad (3.5-19)$$

在透镜比较薄的情况下, 只要能够满足上式, 则产生损耗的主要原因不复存在, 所以聚光效率为 100%。菲涅耳透镜的聚光特性主要取决于菲涅耳局部透镜界面 x_m 的排列, 也就是它的周期结构, 而且即使是偏离了式(3.5-17)~式(3.5-19)所规定的条件, 也几乎不受影响。只不过在这些式子所规定的条件得不到满足的场合下, 效率会下降。在这种透镜研究的初期, 为了容易制作, 曾经采用过将式(3.5-15)的值仅取 0 和 $-\pi$ 两个值的突变型相位调制法制成与之近似对应的透镜。这种初期透镜作为原始的相位调制型, 将传统的菲涅耳局部透镜板制作成光波导型器件, 被称为菲涅耳透镜, 其理论上的最大聚光效率为 40%。

3.5.4 微透镜阵列

微透镜是指直径在微米量级的微小透镜, 由这些小透镜构成的阵列称为微透镜阵列。图 3-27 是微透镜阵列制作的示意图。通过熔融盐中的金属离子与玻璃中的金属离子交换, 形成折射率呈现球形变化、性能类似于透镜的区域。

光波透过微透镜阵列时, 波前受到同样的调制, 经过衍射后继续传播, 微透镜处光波的相位分布与输出平面上的光强是一一对应的, 即一种相位分布对应一种光强分布。微透镜阵列应用于光源和探测器阵列中, 可以实现光束耦合、准直、会聚和扩束等多种功能, 可以极大地提高耦合效率。

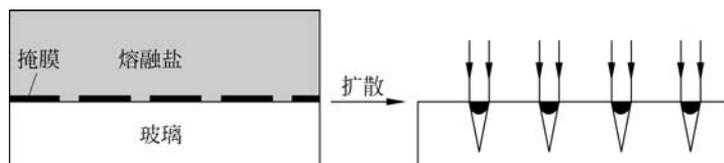


图 3-27 微透镜阵列制作的示意图

本节讲述了光波导型透镜的种类、结构和基本原理,要点归纳于表 3-5 中。

表 3-5 光波导型透镜

光波导型透镜	光波导型透镜是对传输于光波导内的导波光发挥透镜功能的器件
光波导型透镜的种类	常用的光波导型透镜主要有模折射率透镜、短程透镜和非涅耳型透镜

3.6 光波导传感器

通常把能够收集、测量并传递信息的器件称为传感器。光波导传感器是一种平面型光波导,具有灵敏度高,稳定可靠的优点。当前应用的光波导传感器主要有温度传感器、压力传感器、微位移传感器和振动传感器。本节将讲述它们的结构和工作原理。

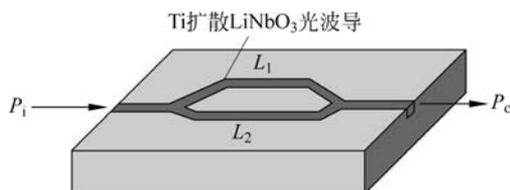
3.6.1 光波导温度传感器

光波导温度传感器结构如图 3-28 所示。它的基本元件是光波导的马赫-泽德干涉仪(Mach-Zehnder),将一输入通道光波导分成不等长的两臂 L_1 和 L_2 ,然后再汇合形成输出光波导。由于 LiNbO_3 在环境温度的影响下会发生伸缩和折射率变化,从而导致两臂间的光程差和位相差变化,光程差变化为

$$\Delta L = L_1 - L_2 \quad (3.6-1)$$

两臂间的位相差变化为

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi N \Delta L}{\lambda_0} \quad (3.6-2)$$


 图 3-28 LiNbO_3 光波导温度传感器结构示意图

位相差变化用两条长度不同的光波导的输出光强度不同的形式而被检测出来,变化 π 位相需要的温度变化 T_π 取决于干涉仪的光程差变化。器件温度的变化通过传输光功率的变化来测定。

$$\frac{P_o}{P_i} = \frac{\gamma}{2} \left[1 + m \cos \left(\frac{2\pi}{\lambda} b \Delta L T + \Delta\varphi_0 \right) \right] \quad (3.6-3)$$

式中, γ, m 是与插入损耗和调制深度有关的常数, 理想器件 $\gamma = m = 1$; $\Delta\varphi_0$ 是常数, 是测量前的光程差引起的位相差; b 是比例常数。

$$b = \frac{dN}{dt} + \frac{N}{\Delta L} \frac{d(\Delta L)}{dt} \quad (3.6-4)$$

应当注意的是, 单个干涉仪不可能同时提供较宽的温度测量范围和高的分辨率。根据经验公式

$$\Delta T = \frac{\lambda}{2b\Delta L} \quad (3.6-5)$$

可知, ΔL 增加可提高灵敏度, 但降低了工作范围, 因此, 常采用多个干涉仪组成的温度传感器。

3.6.2 光波导压力传感器

光波导压力传感器结构如图 3-29 所示。

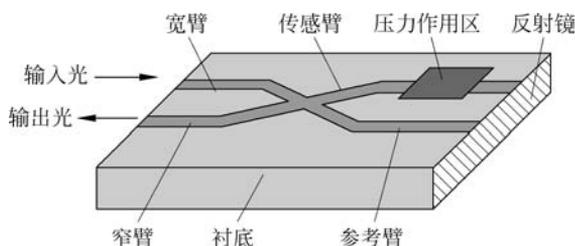


图 3-29 光波导压力传感器结构示意图

为了理解光波导压力传感器的原理, 先明确几个基本概念:

(1) 弹光效应: 是指介质受到弹性应力或应变的作用, 改变了折射率或介电常数, 从而改变光传输特性。

(2) 电光效应: 是指对介质加电场, 使介质的折射率改变, 从而影响光的传输特性。

(3) 半波压力: 是指位相差为 π 时, 作用在传感臂上的压力。

弹光效应或电光效应引起折射率变化, 从而导致传感臂与参考臂之间光程差的变化, 进一步引起位相差发生变化, 把位相差转化成强度信号, 从而可以测量所加压力大小。如图 3-29 所示的等臂压力传感器的原理是: 用光纤将激光耦合到脊形光波导上, 光波导分成传感光波导和参考光波导, 两路均为单模光波导, 分别构成干涉仪的传感臂和参考臂。传感臂位于弹性薄膜的边缘置于被测压力的环境中, 反映膜片所受的压力信号; 而参考臂不受膜片压力的影响只传送参考信号。压力信号通过应力与光传播常数(包括光的偏振、相位和振幅等)多种转换机制的关系实现, 在整个过程中同时有两个因素促使传感臂光传播相位的改变, 一个是由于光弹性效应, 即当弹性薄膜受到外界压力作用变形时, 薄膜内产生应力引起弹性薄膜上光波导介质介电常数的扰动, 导致介质有效折射率的变化, 从而改变介质中光波的传播常数; 另一个是由于薄膜受力弯曲产生的光程变化。当光穿过 Y 结光波导时, 若两臂的光程在光源相干长度内, 那么沿两路传播的光束经合成后将在两臂的会聚点产生干涉, 并形成一系列明暗相间的干涉条纹, 此时在 Y 结处由相位变化产生干涉光强为

$$I = I_0/2(1 + \cos\delta) \quad (3.6-6)$$

式中, I_0 是入射光强度; δ 是位相差。

变化的光强可以用集成光电二极管在传感光波导和参考光波导汇合端处测得。这种双臂式结构有如下要求: 两臂 Y 结分支角不能超过 0.02rad , 以降低损耗; 两臂平行部分之间的距离应大于 $50\mu\text{m}$, 以减小两臂之间各种性能的干扰; 传感臂的水平直线部分应置于机械薄膜边缘上, 可增大传感器的灵敏度。这种等臂的光波导压力传感器与单臂的硅基光波导压力传感器相比, 其显著的优点是两臂相等具有很好的温度补偿作用, 从而避免了温度变化带来的影响。

3.6.3 光波导微位移传感器

光波导微位移传感器结构如图 3-30 所示。传感臂端面反射镜贴在被测物体上, 而参考臂端面反射镜仍贴在光波导上。

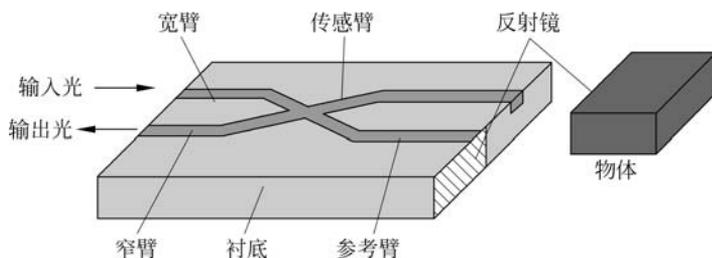


图 3-30 光波导微位移传感器结构示意图

光波导微位移传感器由传感臂射出的光, 一般经过透镜后照射到物体上, 经物体表面的反射镜反射后再次回馈到光波导中。由于通过传感臂的光程随物体移动而改变, 而通过参考臂的光程是固定的, 因此, 通过与参考臂中所传输的光进行和波与干涉, 将所产生的光波位相差在混合耦合器中转换成光强信号, 就可以对物体的位移进行测量。

3.6.4 光波导振动传感器

光波导振动传感器结构如图 3-31 所示。振动物与悬臂光纤相连, 两光波导(条宽 $50\mu\text{m}$, 槽深 $20\mu\text{m}$)用硅橡胶黏合在一起, 彼此隔离。

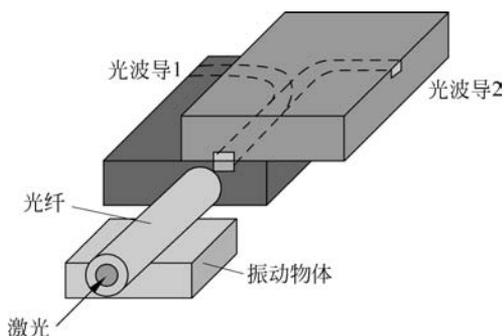


图 3-31 光波导振动传感器结构示意图

当物体发生振动时,光通过光波导 1 和光波导 2 的光强就会发生变化,这样通过测量光波导 1 和光波导 2 的功率比,就可以测定物体振动量的大小和方向。

本节讲述了光波导传感器的种类、结构和基本原理,要点归纳于表 3-6 中。

表 3-6 光波导传感器

光波导传感器	光波导传感器是能够收集、测量并传递信息的一种平面型光波导器件
光波导传感器的种类	主要有温度传感器、压力传感器、微位移传感器和振动传感器

小结 3

本章在介绍光波导无源器件、有源器件、混合集成光路和单片集成光路等概念之后,简述了光路变换器、功率分配器、偏光器、波长分波器、透镜和光波导传感器等光波导型元器件的种类、结构和工作原理。

习题 3

- 3-1 简述光路变换器的种类、结构和工作原理。
- 3-2 简述功率分配器的种类、结构和工作原理。
- 3-3 简述偏振器的种类、结构和工作原理。
- 3-4 简述模分割器的种类、结构和工作原理。
- 3-5 简述模变换器的结构和工作原理。
- 3-6 简述光波导型透镜的种类、结构和工作原理。
- 3-7 什么是 3dB 耦合器?
- 3-8 什么是 100% 耦合器?
- 3-9 简述金属包层偏振器的原理。
- 3-10 简述三层结构分支光波导的模分割原理。
- 3-11 简述光波导压力传感器的原理。
- 3-12 简述光波导振动传感器的原理。
- 3-13 简述光波导微位移传感器的原理。
- 3-14 简述各向异性晶体偏振器的原理。
- 3-15 简述 Y 形分支光波导模分割原理。
- 3-16 推导模折射率透镜曲面方程。