

本章主要介绍光传输介质波导及其结构,为光波导的结构设计和器件研制提供典型分析示例。首先,简介光传输介质内容,包括光传输介质的概念、极化及其典型分类;其次,介绍光传输介质波导内容,包括介质波导和光波导的概念、光波导分类及应用;最后,介绍典型光波导结构,包括基本型、平板型、圆柱型、微结构型、弯曲型、特殊型光波导。

3.1 光传输介质

3.1.1 基本概念

光传输介质通常是指能够引导并传输光波的电介质。电介质通常是指不导电的物质,即绝缘体,其内部没有可移动的电荷。把电介质放入静电场中,达到静电平衡时,其内部场强也不为零,这是电介质与导体电性能的主要差别。

3.1.2 介质极化

光传输介质受到外场(电场或磁场等)的作用将产生极化现象,即电介质的极化。该过程包括三个基本过程:一是原子核外电子云的畸变极化;二是分子中正、负离子的(相对)位移极化;三是分子固有电矩的转向极化。

3.1.3 介质分类

光传输介质因考虑的角度不同而有诸多分类方式,其典型代表有各向同性介质、各向异性介质、均匀介质和非均匀介质。

1. 各向同性介质

各向同性介质(IM)是指物理性质与方向无关的介质,这属于理想化的介质,如各向同性电性介质、各向同性弹性介质等。此处的物理性质(以下同)包括力学、热学、电学、磁学、光学等性质。一般而言,各向同性介质的原子通常排列无规律性,其整体(统计学)上各个方向的原子平均距离一样,因此在各个方向上的物理性质是相同的。各向同性介质与介质对称性有所差异,后者是指介质(晶体)的几何形态因其内部结构在某些不同方向,或在同一方向不同位置存在规则的重复性。

2. 各向异性介质

各向异性介质(AM)是指物理性质与方向有关的介质,即其物理性质的测量值与方向

相关。各向异性介质(如一些晶体)的原子排列规则,因其在各个方向上原子间距不同而具有不同的晶格常数,故不同方向上的物理性质也不同。介质(晶体)性质的各向异性,表明介质(晶体)结构具有方向性。各向异性介质的典型代表是某些具有双折射特点的固态晶体,其中如方解石、石英、红宝石、冰等为单轴晶体,而云母、结晶硫黄、蓝宝石、橄榄石等则为双轴晶体。

3. 均匀介质

均匀介质(HD)是指内部各处在分子水平上具有相同物理性质的介质。均匀介质可以是各向同性的,也可以是各向异性的。对于各向异性的均匀介质,其含义为沿某一方向介质的物理性质是一样的;而改变其方向,其物理性质与前一方向则有所不同,但新方向上的物理性质是一样的。自然界中不存在理想的均匀介质,但对于折射率变化缓慢或很微小的介质,在实际分析中常将其视为均匀介质。

4. 非均匀介质

非均匀介质(ID)是指介质内部各处在分子水平上具有不同物理性质的电介质,如折射率呈现空间规则(线性、周期性等)变化或一些区域呈现不规则变化等。一般的介质具有非均匀性及各向异性,其中非均匀性表征介质的宏观特征,而各向异性则表征介质的微观特征。

3.2 介质光波导

3.2.1 介质波导概述

介质波导(DWG)是具有限定和引导电磁波功能的管道或传输线介质结构。介质波导一般是由固态的介质棒或由导电材料和介质材料组成的混合构件,如空心金属管就是一种最普通的介质波导。对于固体和凝聚态物质,因其结构比较紧密,介质内的粒子(分子、原子、离子以及电子等)相互作用较强,故其关联性也较强。当介质波导受到电磁场或光波作用时,将激发其表面或内部的粒子运动,引起粒子间相互带动,造成集体运动或激发,从而改变电磁场或光波的传输状态。

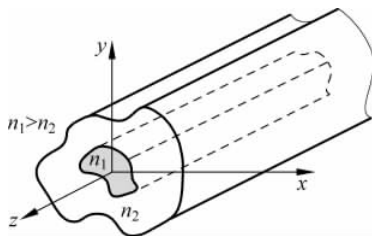


图 3.2-1 一般介质波导结构

对介质波导而言,一般只允许电磁能流沿着波导结构的纵向传输,而在波导结构的垂直方向(横向)则禁止传输。具有任意截面且介电常数足够大的介质柱体,可将其视为介质波导,如图 3.2-1 所示。其中, n_1 、 n_2 分别为介质波导的芯层和包层折射率,令 $n_1 > n_2$ 以保证电磁能流在波导芯层传输。

3.2.2 光波导简介

光波导(OWG)是光传输介质波导的简称,它是一种能够将光波限制在其内部或表面附近并引导光波沿确定方向传输的介质波导,也是由光透明介质(如石英玻璃、有机材料等)构成的传输光频电磁波的导行结构。光波导传输的基本原理是介质分界面两侧折射率不同使

光波产生全反射,将导波局限在光波导及其周围有限区域内传输。导波的传输方式和波导的光控性能由构成光波导的介质材料和空间结构所决定,其现代光控波长一般介于 $0.8 \sim 1.6 \mu\text{m}$ 之间。

3.2.3 光波导分类

根据结构特征、折射率分布、传输方式、制作材料等诸多因素,光波导可以有多种分类方式。以下是作者归纳、提炼的一些光波导分类方式。

1. 根据结构特征分类

根据结构特征,光波导可分为平板光波导(薄膜光波导)、带状光波导(矩形或脊形光波导)、圆柱光波导(光导纤维)等类型,如图 3.2-2 所示,其中 n_1 、 n_2 和 n_3 分别为波导芯层、衬底和包层的折射率。

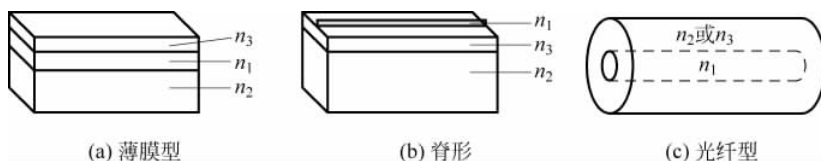


图 3.2-2 具有典型结构特征的光波导结构示意图

2. 根据对称特性分类

根据对称特性,光波导有对称光波导(芯区周围介质折射率相同)及非对称光波导(芯区周围介质折射率不同)之分,如图 3.2-3 所示。

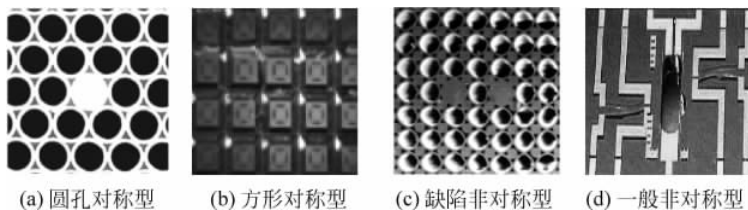


图 3.2-3 具有结构对称与非对称特性的光波导结构

3. 根据折射率分布分类

根据芯层折射率分布特点,光波导亦有均匀(芯层折射率均匀,如阶跃型等)光波导和渐变(芯层折射率不均匀,如抛物线型和三角形等)光波导之别,如图 3.2-4 所示。

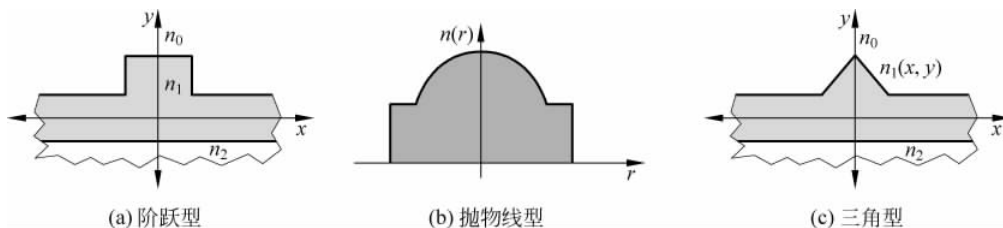


图 3.2-4 具有折射率分布特点的光波导结构图

4. 根据传输模式分类

根据传输模式特点,光波导可分为单模光波导(仅存在一个模式,如单模光纤 SMF)、少模光波导(存在几个模式)和多模光波导(存在多个模式,如多模光纤 MMF)等类型,如图 3.2-5 所示。

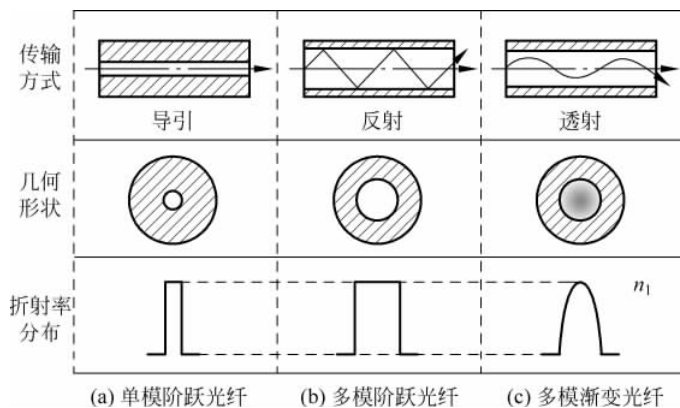


图 3.2-5 具有模式特点的光波导结构示意图

5. 根据制作材料分类

根据制作材料的性质,光波导可分为石英光波导(玻璃)、塑料光波导(有机物)、红外光波导(红外波段)、Ⅲ-V 族材料光波导等类型,如图 3.2-6 所示。

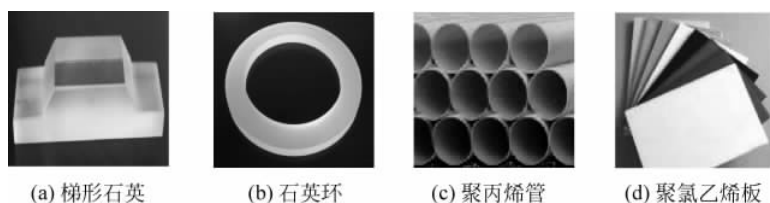


图 3.2-6 由不同材料制作的光波导结构图

6. 根据波导功能分类

根据实现功能的不同,光波导可分为通信光波导、传感光波导以及可调光波导等类型,如图 3.2-7 所示。

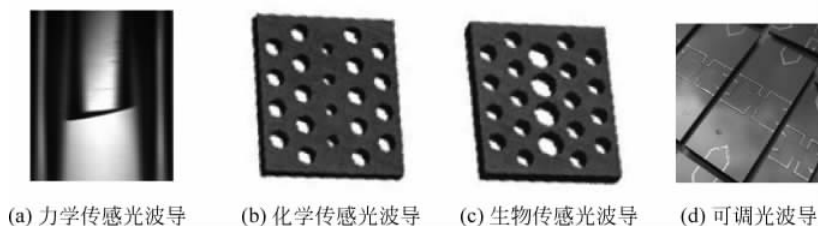


图 3.2-7 具有不同功能的光波导结构图

7. 特种类型的光波导

此类光波导是指根据特殊结构或特殊功能需要而设计研制的光波导。例如,锥形光波

导、圆台形光波导、嵌入式光波导、组合型光波导、偏振光波导(POWG,如保偏光纤、单偏振光纤等)、色散光波导(DOWG,如负色散光纤)、有源光波导(AOWG,如掺杂光纤)、抗辐射光波导(RROWG,如耐辐射光纤)以及发光光波导(LEOWG,如发光光纤)等,如图 3.2-8 所示。

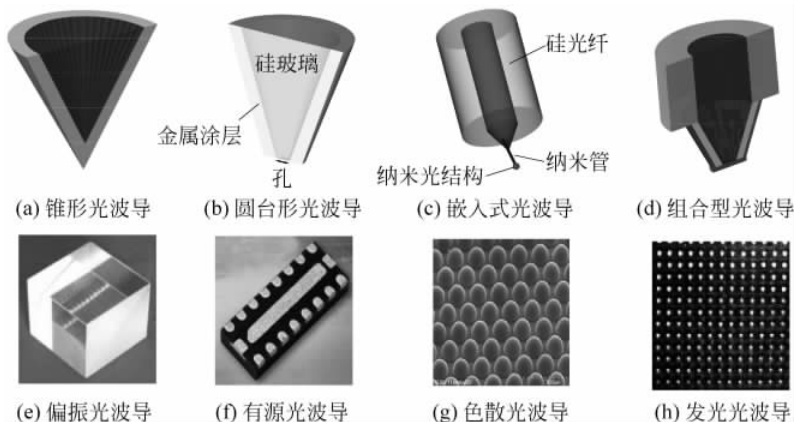


图 3.2-8 特种类型光波导结构图

3.3 典型光波导

常用的典型光波导有平板光波导、圆柱光波导、微结构光波导、弯曲光波导和特种光波导,下面分别加以简介。

3.3.1 平板光波导

平板光波导是光波导中最简单、最具代表性的结构之一,如图 3.3-1 所示。其中,芯层

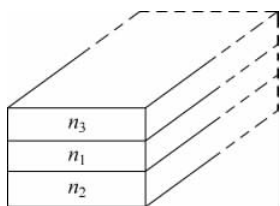


图 3.3-1 光波导三层结构示意图

厚度一般为 $1\sim 10\mu\text{m}$ (光波长量级),包层通常为空气,芯层与衬底折射率之差一般为 $10^{-3}\sim 10^{-1}$ 。在与横截面垂直的纵向上,光波导无限延伸,其折射率分布与纵向无关。若不考虑光波导的激励,一般则忽略光源影响而着重研究光波的纵向传输。因光波在横向受到充分约束而无辐射或泄漏,故可沿纵向传输,这种光波称为导波,其基本传输模式称为导波模或导模。若光波在横向上有辐射,则其基本传输模式称为辐射模。

采用光线分析法可知,欲使光线在平板光波导内发生全反射,需使光线在上、下界面的入射角 θ 分别大于相应的两个(全反射)临界角,即 $\theta > \theta_{13} = \arcsin(n_3/n_1)$ 和 $\theta > \theta_{12} = \arcsin(n_2/n_1)$ 。因 $n_1 > n_2 > n_3$,故 $\theta_{12} > \theta_{13}$ 。于是,当 $\theta > \theta_{12} > \theta_{13}$ 时,光线经全反射完全约束在光波导中,并以 Z 字形路线自由传输形成导模;当 $\theta_{12} > \theta > \theta_{13}$ 时,光线由平板光波导衬底一侧入射并从芯层又折射到衬底之中,光线不能完全限制在光波导内,而是辐射到衬底半无限空间之中,形成衬底辐射模或衬底模;当 $\theta_{13} > \theta > 0$ 时,光线由平板光波导的一侧(衬底或包层)入射经芯层折射到另外一侧(包层或衬底)之中,光线完全未限制在光波导内,而是辐射到衬底或包层两个半无限空间之中,形成包层辐射模或包层模。

这三种情况如图 3.3-2 所示。

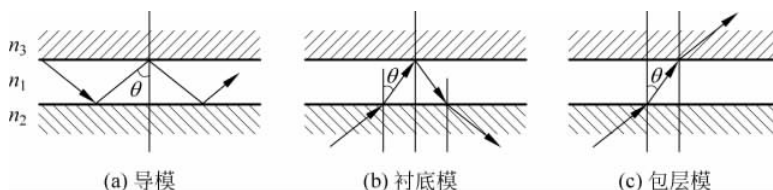


图 3.3-2 平板波导中的光线传输模式示意图

平板光波导主要有对称和非对称两大基本类型。前者有对称均匀型(如对称阶跃型)和对称非均匀型(如对称渐变型)之分,后者又有非对称均匀型(如非对称阶跃型)和非对称非均匀型(如非对称渐变型)之别。下面分别简要介绍。

1. 对称平板光波导

(1) 对称非均匀型平板光波导。以三层对称渐变型平板光波导为例,其折射率分布形式如下

$$n(x) = \begin{cases} n_2 & -\infty < x < x_1 \\ f(x) & x_1 \leq x \leq x_2 \quad [f(x) > n_2 > n_3] \\ n_2 & x_2 < x < \infty \end{cases} \quad (3.3-1)$$

式中, $f(0) = n_1$, 且 $f(-x) = f(x)$ 。其光线传输沿蛇形线行进,如图 3.3-3 所示。

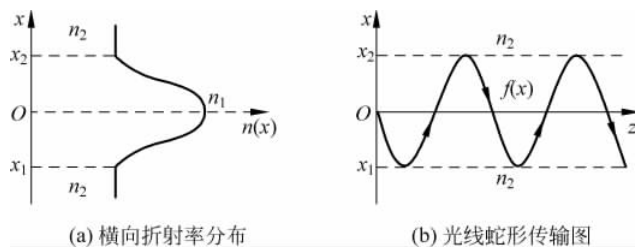


图 3.3-3 三层对称渐变型平板光波导示意图

(2) 对称均匀型平板光波导。令式(3.3-1)中的 $f(x) = n_1$, 且 $f(-x) = f(x)$, 即对应于三层对称阶跃型平板光波导情形。其中,折射率分布如图 3.2-4(a)所示;光线传输沿折线行进,如图 3.3-2(a)所示。

2. 非对称平板光波导

(1) 非对称均匀型平板光波导。以三层非对称阶跃型平板光波导为例,其折射率分布形式如下

$$n(x) = \begin{cases} n_3 & -\infty < x < 0 \\ n_1 & 0 \leq x \leq x_1 \quad (n_1 > n_2 > n_3) \\ n_2 & x_1 < x < \infty \end{cases} \quad (3.3-2)$$

其光线传输沿折线行进,如图 3.3-4 所示。

(2) 非对称非均匀型平板光波导。以三层非对称渐变型平板光波导为例,其折射率分布形式如下

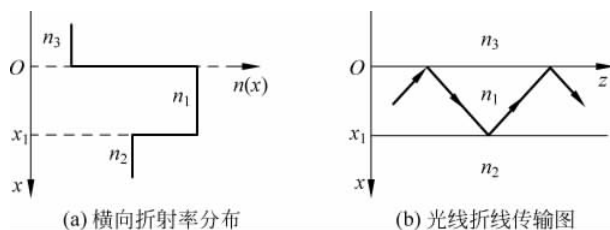


图 3.3-4 三层非对称阶跃型平板光波导示意图

$$n(x) = \begin{cases} n_3 & -\infty < x < 0 \\ f(x) & 0 \leq x \leq x_1 \\ n_2 & x_1 < x < \infty \end{cases} \quad [f(x) > n_2 > n_3] \quad (3.3-3)$$

式中, $f(0) = n_1$, 且 $f(-x) \neq f(x)$ 。其光线传输沿弧线行进, 如图 3.3-5 所示。

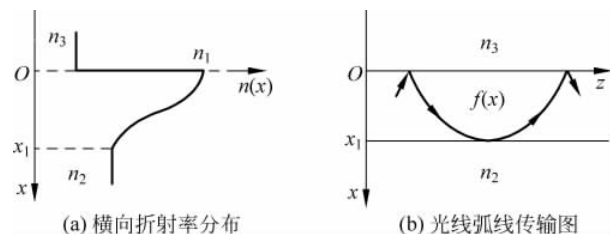


图 3.3-5 三层非对称渐变型平板光波导示意图

3.3.2 圆柱光波导

圆柱光波导是光波导中最常用、最具特色的结构之一, 其最具代表性的是光导纤维, 简称光纤。常规光纤的剖面结构如图 3.3-6 所示。石英光纤是常规光纤的代表, 其主要成分是二氧化硅(SiO_2), 由纤芯、包层、涂覆层组成。图 3.3-6 中的 a 、 b 分别为纤芯和包层的半径, 纤芯折射率较高, 主要成分为掺杂二氧化锗(GeO_2)的二氧化硅, 掺杂的目的是为了提高纤芯的折射率, 纤芯直径一般在 $5 \sim 50 \mu\text{m}$ 之间; 包层折射率略低于纤芯折射率, 成分一般为纯二氧化硅, 包层直径的标准值为 $125 \mu\text{m}$; 涂覆层为环氧树脂、硅橡胶等高分子材料, 其外径约 $250 \mu\text{m}$, 涂覆的目的在于增强光纤的机械强度和柔韧性。

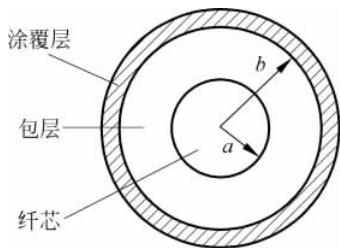


图 3.3-6 光纤的剖面结构示意图

根据横截面上折射率的径向分布特征, 圆柱光波导可以大致分为均匀(阶跃)型和非均匀(渐变)型两大类。

1. 均匀圆柱光波导

均匀圆柱光波导的典型代表是阶跃型光导纤维, 简称阶跃型光纤, 其横截面上的折射率分布为

$$n = \begin{cases} n_1 & 0 \leq r \leq a \\ n_2 & a < r \leq b \end{cases} \quad (n_1 > n_2) \quad (3.3-4)$$

式中, r 为均匀光纤的径向坐标; a 为纤芯半径; b 为包层半径; 纤芯和包层的折射率 n_1 和 n_2 均为常数, 在 $r=a$ 处折射率呈阶跃式变化, 如图 3.3-7(a) 所示。

在阶跃型光纤中存在两类光线, 分别称为子午光线(MR)和偏斜光线(SR)。子午光线是指在子午平面上传输的光线, 在一个周期内和光纤中心轴相交两次。子午平面是指通过光纤中心轴的所有平面, 显然, 子午面有无数多个。子午光线的轨迹是子午平面内的一系列折线, 如图 3.3-7(b)、(c) 所示。

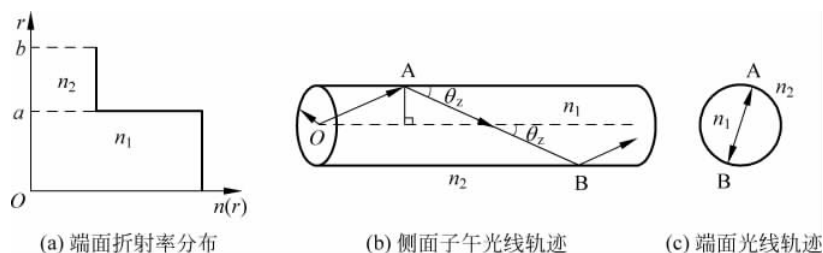


图 3.3-7 均匀圆柱光波导示意图

偏斜光线是指不在子午平面内的光线, 它们与光纤轴既不平行也不相交, 因而不限于单一平面之内。偏斜光线轨迹一般是一系列空间螺旋折线, 既可为左旋, 也可为右旋, 但它们与光纤的中心轴是等距的, 并被限制在 $r_0 \leq r_{ic} \leq a$ 的圆筒内传输, 即光线轨迹折线范围是在纤芯-包层边界这一圆柱面($r_{ic}=a$)与一个半径小于纤芯半径的圆柱面($r_{ic}=r_0 < a$)之间, 并在光纤端面的投影形成一个多边形, 如图 3.3-8 所示。其中, 由 $r_{ic}=r_0$ 构成的圆柱面(即内接圆)称为内散焦面, 电磁场在此范围内呈驻波形式, 而在此范围之外则呈逐渐衰减形式; 方位角(AA) θ_ϕ 是光线在光纤端面上的投影线与反射点处纤壁切线的夹角。

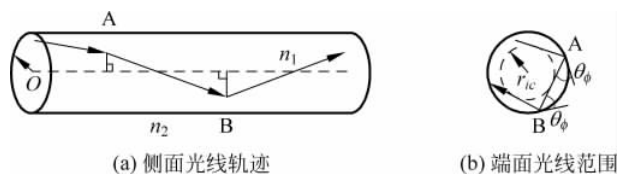


图 3.3-8 偏斜光线轨迹示意图

2. 非均匀圆柱光波导

非均匀圆柱光波导的纤芯折射率呈渐变分布, 其典型代表是渐变型光导纤维, 简称渐变型光纤。这里的渐变型光纤是指纤芯的折射率是渐变(或梯度)的, 而包层的折射率是均匀的光纤。渐变型光纤的折射率分布一般表达式为

$$n(r) = \begin{cases} n_1 \left[1 - 2\Delta \cdot f\left(\frac{r}{a}\right) \right]^{\frac{1}{2}} & 0 \leq r \leq a \\ n_2 & a < r \leq b \end{cases} \quad (n_1 > n_2) \quad (3.3-5)$$

式中, n_1 是 $r=0$ 的折射率; 函数 f 满足 $f(r/a) \leq f(1)=1$, 一般可取 $f(r/a) = (r/a)^g$; Δ 为光纤的相对折射率差; g 为折射率分布参数, 它决定了折射率分布曲线的形状。当 $g = \infty$ 时, 即为阶跃分布光纤; 当 $g=2$ 时, 为平方律分布(或抛物线分布)光纤, 亦称聚焦光纤; 当 $g=1$ 时, 为三角分布光纤。 $n(r)$ 与 r 的关系曲线如图 3.3-9(a) 所示。

在渐变光纤中也存在子午光线和偏斜光线两类光线。但偏斜光线不会出现折线轨迹,而是一系列空间歪斜状轨迹。从光纤端面观察,偏斜光线是如图 3.3-9(b)所示的类椭圆轨迹。在特殊情况下,从光纤端面观察,可出现如图 3.3-9(c)所示的圆形轨迹,即螺旋光线(HR)。

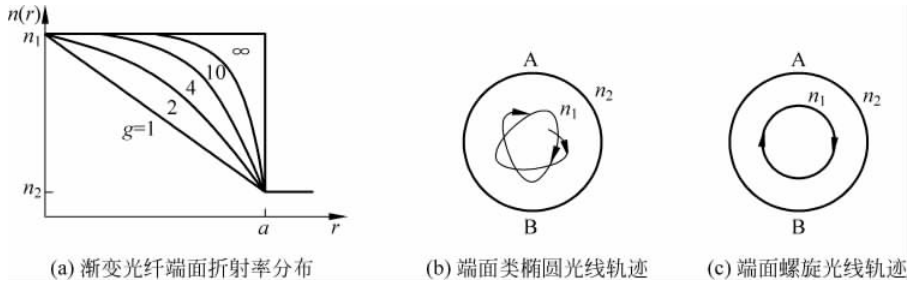


图 3.3-9 非均匀型圆柱光波导示意图

3.3.3 微结构光波导

近年来,利用激光技术(特别是飞秒激光脉冲技术)对光波导表面及内部进行微加工,已成功研制出各种具有优异功能的新型光波导,如图 3.3-10 所示。特别是微结构光纤(MSF)[包括光子晶体光纤(PCF)]等特种光纤的不断出现,为新型光波导的研制提供了更加丰富的创造空间和应用领域。其中,基于单芯、双芯、三芯、多芯等结构变形、局部刻蚀、成栅与拉锥、材料填充等新型微结构光纤波导不断出现,如图 3.3-11 所示。

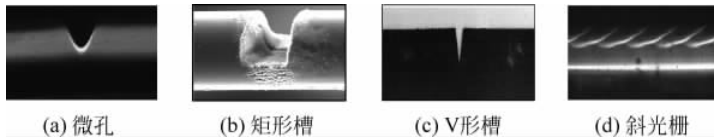


图 3.3-10 微结构光波导结构图

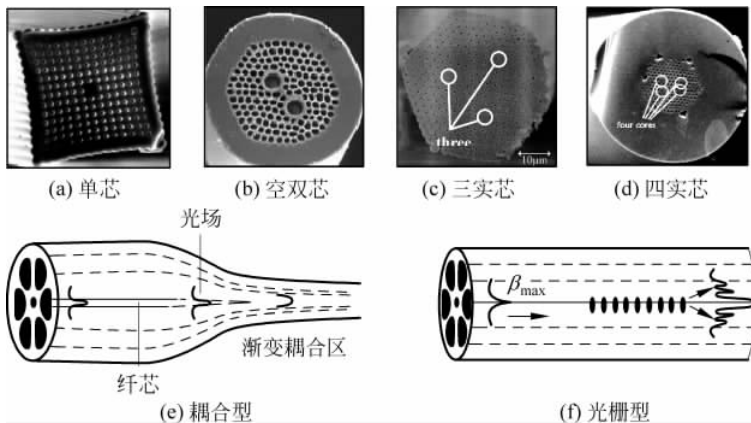


图 3.3-11 微结构光纤波导结构图

3.3.4 弯曲光波导

弯曲光波导一般是指在结构上具有某种弯曲特性的光波导。例如,圆弧弯(如 E 面、H 面弯曲等)、扭曲、折弯(如 E 面、H 面折弯等)以及折角弯等类型的光波导,如图 3.3-12 所示。

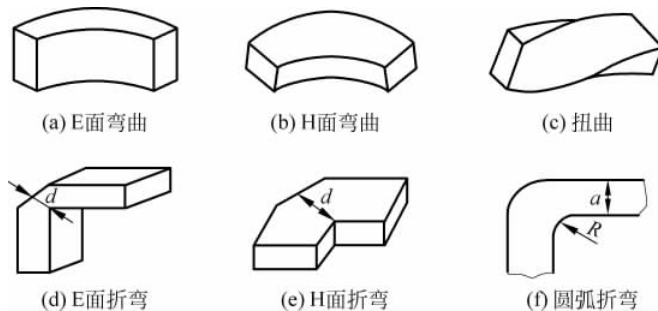


图 3.3-12 弯曲光波导结构图

3.3.5 特种光波导

特种光波导一般是指因结构的特殊性而具有某种特殊功能的光波导。例如,周期性光波导就是最为典型的一类特种光波导,其主要代表有光栅波导、光栅耦合器等,如图 3.3-13 所示。

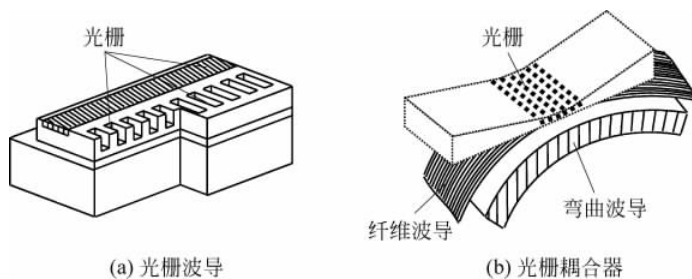


图 3.3-13 光栅波导及耦合器结构图

此外,利用光波导(尤其是光纤)之间的错位、扭曲、拉锥、抛磨、填充、腐蚀、过熔、刻栅以及涂覆等方式实现的波导干涉器,也具有一些独特的光学性能。如图 3.3-14 所示。

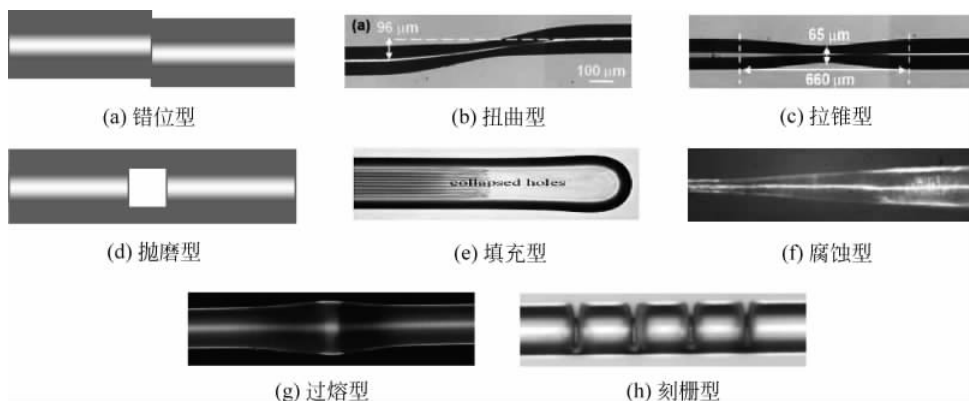


图 3.3-14 功能型光波导结构图

根据上述丰富的波导结构展示以及功能的简要分析,我们有理由确信:随着激光(特别是飞秒激光)微加工技术的进步和新功能材料的不断创新,结构新颖、性能优异的光波导及其功能器件将在光测量、光通信和光传感等领域发挥愈来愈重要的作用。

本章小结

光传输介质通常指能够引导并传输光波的电介质,因考虑的角度不同而有诸多分类方式,光传输介质的典型代表有各向同性介质、各向异性介质、均匀介质和非均匀介质。

光波导是一种能够将光波限制在其内部或表面附近并引导沿确定方向传输的介质波导,它是由光透明介质(如石英玻璃、有机材料等)构成的传输光频电磁波的导行结构。光波导也是集成光波回路的基本单元结构,在信号处理、光通信和光传感等诸多领域得到了广泛应用。

根据结构特征、折射率分布、传输方式、制作材料等诸多因素,光波导可以有多种分类方式,实用光波导主要有光导纤维、薄膜波导、带状波导三类。光波导虽然结构丰富,种类多,但其共同点是中央区间介质的折射率高于周围介质区的折射率。

平板光波导是光波导中最简单、最具代表性的结构之一,主要有对称和非对称两大基本类型。前者有对称均匀型(如对称阶跃型)和对称非均匀型(如对称渐变型)之分,后者又有非对称均匀型(如非对称阶跃型)和非对称非均匀型(如非对称渐变型)之别。

圆柱光波导是光波导中最常用、最具特色的结构之一,其最具代表性的是光导纤维,简称光纤。根据横截面折射率径向分布特征,圆柱光波导主要分为均匀型和非均匀型两大类。光纤及其器件是现代光通信系统和光传感系统不可或缺的组成部分,其作用重大且意义深远。

微结构光波导是近年来利用激光技术(特别是飞秒激光脉冲技术)对光波导表面及内部进行微加工制作的新型光波导,因其微结构的丰富性而使这种新型光波导性能优异且功能独特。

弯曲光波导一般是指在结构上具有某种弯曲特性的光波导,常见的有E面弯曲、H面弯曲、扭曲、折弯、圆弧弯等类型的光波导。

特种光波导一般是指因结构的特殊性而具有某种特殊功能的光波导,周期性光波导就是最为典型的一类特种光波导。此外,利用光波导之间的错位、扭曲、拉锥、抛磨、腐蚀、填充、熔接、刻栅以及涂敷等方式实现的波导干涉器,也具有一些独特的干涉性能。

设计并研制结构新颖、性能优异的光波导及其功能器件,是现代光测量、光通信和光传感领域科学研究、技术创新及推广应用的迫切需求。

问题与思考

- 3.1 何谓光传输介质?它与一般的介质有何区别?
- 3.2 光传输介质是如何分类的?其典型代表是什么?试给出分类的依据和理由。
- 3.3 什么是光波导?光波导有哪些基本类型?试给出分类依据和理由。
- 3.4 试从物理结构和传输模式等方面,阐述单模光波导和多模光波导的区别。

3.5 与常规光波导相比,微结构光波导在结构和性能上有何特点?为什么?

3.6 除书中介绍的光波导之外,你还了解哪些其他类型的光波导?试查询并整理出一篇新型光波导调研报告。

3.7 光栅是周期性光波导的典型代表,试查询并整理出一篇光栅波导调研报告。

3.8 介质表面涂覆金属,可以制作电磁型光波导。试查询并整理出一篇金属涂覆光波导调研报告。

3.9 复合光波导是指将若干类型不同的光波导进行有机集成形成的光波导。试查询并整理出一篇复合光波导调研报告。

3.10 利用激光技术对光波导表面及内部进行微加工,能够获得功能优异的新型光波导。试查询飞秒激光脉冲技术的发展动态,整理出一篇利用该技术制作光波导的调研报告。

3.11 除激光微加工技术之外,还可利用其他技术制作光波导。试调研并整理出一篇利用非激光技术制作光波导的专题报告。

3.12 调研有关制备光纤预制棒方法方面的文献,整理出一篇光纤预制棒制备专题报告。