

罗先和 张广军 编著
骆飞 宋育东

光电检测技术

北京航空航天大学出版社

光电检测技术

罗先和 张广军
骆 飞 宋育东 编著

北京航空航天大学出版社

(京)新登字 166 号

内 容 简 介

本书着重讲授光电检测技术所用的基本原理和基本知识。主要内容有:光和光的特性及其调制原理;光电检测用光源、光电探测器件及光探测技术;光强度调制检测系统;光相位调制检测系统;光偏振调制检测系统;光频率与波长调制检测系统等。

本书重视基本原理,重视与应用实际结合。适合大学本科测试及相关专业作教材使用,也可供从事测试技术的工程技术人员阅读。

图书在版编目(CIP)数据

光电检测技术。—北京:北京航空航天大学出版社,1995.4
ISBN 7-81012-545-1

I. 光… II. Ⅲ. 光电探测器-检测 IV. TN206

中国版本图书馆 CIP 数据核字(95)第 03710 号

光电检测技术

GUANGDIAN JIANGCE JISHU

罗先和 张广军 编著
骆 飞 宋育东

责任编辑 王小青

北京航空航天大学出版社出版

北京海淀区学院路 37 号(100083)

新华书店总店科技发行所发行 各地新华书店经销

朝阳科普印刷厂印装

787×1092 1/16 印张:13.75 字数 352 千字

1995 年 6 月第一版 1995 年 6 月 第一次印刷 印数 4000 册

ISBN 7-81012-545-1 / TN · 026 定价:10.50 元

前 言

本书是根据航空航天工业部 1993~1995 年航空高校教材建设规划,为航空高校《检测技术及仪器仪表》专业而编写的专业教材。

由于光电技术的发展,光电检测技术已经成为检测技术中的重要组成部分之一,应用日益广泛。作为检测技术专业,设置光电检测技术方面的课程是完全必要的。本书作为检测技术及其相关专业的教材,教学为 40~60 学时。本书也可作为从事测试工作的工程技术人员的参考书。

本教材的目的在于使学生掌握光电检测的基本原理、基础知识和基本分析方法。内容包括三大部分:第一部分为第一章。主要介绍光电检测系统的基本工作原理,重点阐述光的调制原理。考虑到本书对象的光学基础,增加了光和光的传播特性内容。第二部分为第二至第四章。讲述光电检测中常用的基本器件——光电检测用光源、光电探测器件及光探测方法。这部分主要了解一些器件、电路的基本原理及特性。第三部分为第五至第八章。按检测系统采用的光调制原理分章。各章中分析一些较典型的光电检测系统的组成原理、工作特点及设计分析方法,突出理论联系实际,培养实际应用能力。对于组成光电检测系统的光学器件,本书没有专门介绍,仅在用到之处加以说明。

光电检测技术涉及到光学、光电子学、电子学、计算机以及检测技术等许多学科领域,内容广泛。作为非光学和非光电子学专业的光电检测技术教材,在有限的学时篇幅中,既要阐明光电检测的工作原理,又要具有实用价值;既要了解光电检测的器件、电路,熟悉检测系统的组成等知识,又要培养一定的分析能力。因此,本书在编写体系上作了如下的安排:除必要的部分内容,如光源、探测器、光探测方法等,采用按检测基本原理(光的调制方法)编排。没有采用按检测对象或参量:温度、压力、速度、……,划分章节的编排方法。光电检测,主要是光的检测。被测参量的变化对光量(光的强度、相位、偏振、频率或波长)调制,然后通过对光调制量的探检,变换,处理等构成光电检测系统。所以先讲述光的调制原理,然后以不同的调制方法分章叙述。某种参量的光电检测,书中列为某种光调制原理应用的实例,分别在有关光调制检测系统章节中分析讨论。这样安排,力图精简内容,突出基本原理,做到理论联系实际和具体应用。

光纤传感技术的发展,利用光纤构成光电检测系统,拓宽了光电检测技术的领域。尤其在一些特殊场合,利用光纤检测系统前景是很好的。因此,在有关章节中加强了这部分内容,包括光纤波导基本知识、光纤干涉仪以及光纤组成的光电检测系统。

本书内容主要依据编著者在校用的讲义,以及教学科研实践的总结。一些

4534/10

检测方法的实例,由编著者的实验和科研项目中提取而来;部分内容、图表来自或参考国内外书刊。

本书由罗先和主编。经过编著者集体讨论分工负责。全书分为八章,第一、四、五章由张广军执笔,第六章由骆飞执笔,第七、八章由宋育东执笔,第二、三章由罗先和执笔。在完成初稿的会审中,骆飞和张广军认真地阅读了全稿,并提出了许多宝贵的修改意见。再稿后张广军和罗先和对部分内容进行了修定、增删。最后由罗先和完成了统稿。

本书由清华大学章恩耀主审。主审对书稿进行了认真细致地审查,提出了许多有益的意见和宝贵的建议。在编写整个过程中,魏鸿然、秦安琳给予了大力支持和具体指导。在此对他们及给予本书帮助的同志们表示衷心谢意。

由于编著者水平所限,不当和欠妥之处,请予批评指正。

编著者

1994年6月

目 录

第一章 光和光的传播特性及光调制原理	(1)
第一节 光和光的传播特性	(1)
一、光 波	(1)
二、光 子	(4)
三、光在光纤介质中的传播	(5)
第二节 光强度调制	(9)
一、辐射式	(9)
二、反射式.....	(10)
三、遮挡式.....	(10)
四、透射式.....	(11)
第三节 光相位调制	(12)
一、光相位调制的原理.....	(12)
二、光的干涉.....	(12)
三、光的衍射.....	(15)
第四节 光的偏振调制	(20)
一、旋光现象.....	(20)
二、法拉第效应.....	(21)
三、光弹效应.....	(21)
四、克尔电光效应.....	(23)
第五节 光的频率和波长调制	(24)
一、光频调制.....	(24)
二、波长调制.....	(26)
第二章 光电检测用光源	(29)
第一节 光的产生	(29)
一、光的辐射.....	(29)
二、光的产生方法.....	(30)
第二节 发光二极管	(31)
一、LED 发光机理及发光光谱	(31)
二、LED 的特性及参数	(32)
三、LED 的驱动电路	(34)
第三节 激光光源	(35)
一、激光的特点.....	(35)

二、 激光的形成	(37)
三、 激光的模式	(39)
四、 氦氖激光器	(41)
五、 半导体激光器	(42)
第四节 其它光源	(43)
一、 热辐射光源	(44)
二、 气体放电光源	(44)
第三章 光电探测器	(46)
第一节 光电探测器原理及特性	(46)
一、 光电探测器的种类	(46)
二、 光电探测器原理	(46)
三、 光电探测器的特性参数	(48)
四、 光电探测器的噪声	(50)
第二节 光电子发射器件	(51)
一、 光电管	(51)
二、 光电倍增管	(54)
第三节 光电导探测器件	(60)
一、 硫化镉 CdS 和硒化镉 CdSe 光敏电阻	(60)
二、 硫化铅 PbS 和硒化铅 PbSe 光敏电阻	(60)
三、 碲化铟 InSb 和砷化铟 InAs 光敏电阻	(62)
四、 杂质光电导探测器	(62)
五、 多元系本征光电导探测器	(63)
第四节 光伏探测器件	(64)
一、 硅光电池	(64)
二、 光电二极管	(66)
三、 其它类型的光电二极管	(68)
四、 光电三极管	(70)
第五节 电荷耦合器件	(72)
一、 CCD 工作原理	(73)
二、 CCD 摄像原理	(77)
三、 CCD 摄像器件的基本性能	(80)
第四章 光探测技术	(81)
第一节 光探测器的偏置	(81)
一、 光探测器的偏置	(81)
二、 几种常用的偏置电路	(81)
第二节 光直接探测方法	(84)
一、 直接探测的基本原理	(84)
二、 直接探测的基本特性	(84)

第三节	光外差探测方法	(86)
一、	光外差探测的基本原理	(86)
二、	光外差探测的空间条件和频率条件	(88)
三、	三频光外差探测	(90)
第四节	弱光信号的探测	(91)
一、	取样积分器	(91)
二、	锁相放大器	(93)
三、	光子计数器	(95)
第五章	光强度调制检测系统	(98)
第一节	光电开关与光电转速计	(98)
一、	光电开关	(98)
二、	光电转速计	(100)
第二节	莫尔条纹测长仪	(102)
一、	莫尔条纹	(102)
二、	莫尔条纹测长原理	(104)
三、	细分判向原理	(105)
四、	置零信号的产生	(109)
第三节	激光测距仪	(109)
一、	脉冲激光测距仪	(109)
二、	相位激光测距仪	(111)
第四节	激光准直仪	(114)
一、	激光准直仪的原理和基本结构	(114)
二、	发射光学系统	(115)
三、	光电目标靶	(116)
第五节	反射型光纤位移测量系统	(118)
一、	位移传感机理	(118)
二、	测量系统组成	(120)
第六节	视频图象测量	(122)
一、	电视图象测量	(122)
二、	CCD 固体摄像测量	(124)
第七节	红外方位探测系统	(127)
一、	调制盘	(128)
二、	位标器结构与工作原理	(103)
三、	坐标变换	(131)
第六章	光相位调制检测系统	(133)
第一节	光相位调制的检测	(133)
一、	光相位调制的探测	(133)
二、	几种基本干涉系统	(133)

三、影响干涉信号的因素	(138)
第二节 干涉测量技术	(140)
一、激光干涉测长的基本原理	(140)
二、激光干涉测长仪的光路设置	(141)
三、干涉信号的方向判别与计数	(143)
四、干涉信号的移相技术	(143)
五、对测量系统的设计考虑	(147)
六、折射率的干涉测量方法	(148)
七、调制干涉测量技术	(149)
第三节 相位调制型光纤传感器	(151)
一、光纤相位调制原理	(152)
二、光纤干涉仪的光相位检测	(154)
三、光纤干涉仪的应用	(155)
第四节 光衍射测量技术	(161)
一、测量原理	(161)
二、基本方案及其分析	(161)
三、间隙测量法	(163)
四、应用互补原理的衍射测量	(166)
五、测量精度与最大量程	(167)
第七章 光偏振调制检测系统	(169)
第一节 光偏振检测系统有关光学器件	(169)
一、波片	(169)
二、偏振分光器件	(171)
三、棱镜反射器	(172)
第二节 光弹性效应测力计	(173)
一、光弹性效应测力计工作原理	(173)
二、光弹性效应测力计的基本结构	(174)
第三节 光纤电流电压测试系统	(175)
一、磁光式光纤电流测试系统	(175)
二、光纤电压测试系统	(177)
第八章 光频率与波长调制检测系统	(182)
第一节 激光多普勒测速仪	(182)
一、激光测速仪中的外差检测模式	(182)
二、激光测速仪的构成与特点	(186)
三、流速方向的判别	(186)
四、二维激光测速原理与光路	(187)
五、激光多普勒信号处理方式	(188)
六、激光测速仪的应用	(189)

第二节 双频激光测长仪.....	(189)
一、双频激光干涉测长原理	(189)
二、双频测长仪与单频干涉仪的比较	(190)
三、双频激光的产生	(191)
四、应用举例	(192)
第三节 光电比色温度计.....	(194)
一、比色测温法原理	(194)
二、单通道光色比色温度计	(197)
三、双通道光色比色温度计	(199)
第四节 光电荧光计.....	(200)
一、测量溶液浓度的光电荧光计	(200)
二、供固体试样用的光电荧光计	(202)
三、由光电分光光度计改装的荧光计	(202)
思考题和习题.....	(204)
参考文献.....	(207)

第一章 光和光的传播特性及光调制原理

光调制技术在光电检测中是极为重要的技术,它是将各种被测物理量的有关信息以信号的形式载到光波上去,这种承载信息的调制光由探测系统解调,然后检测出所需要的信息。光调制可分为:强度调制、相位调制、偏振调制、频率调制和波长调制等。本章首先讨论光和光的传播特性,在此基础上介绍光电检测中常用的各种光调制原理,并且归纳和比较了它们的应用范围和特点。以后各章所介绍的各种光电检测系统都是从不同的方面利用了这些调制原理。

第一节 光和光的传播特性

光的一个基本性质就是具有波粒二象性。一方面光是电磁波具有波动的性质,有一定的频率和波长。另一方面光是光子流,光子是具有一定能量和动量的物质粒子。波动性和粒子性是光的客观属性,二者总是同时存在的。但在一定条件下,可能某一方面的属性比较明显,而当条件改变后,另一方面的属性又变得明显。例如,光在传播过程中所表现的干涉、衍射等现象中其波动性较为明显,这时往往把光看作是由一列列的光波组成的;而当光和实物互相作用时(例如光的吸收、发射、光电效应等),其粒子性较为明显,这时往往又把光看作是由一个一个光子组成的光子流。

一、光 波

光波是一种电磁波,是交变电磁场在空间的传播。也就是说,光波既是电矢量 E 的振动和传播,同时又是磁矢量 B 的振动和传播。在均匀介质中,电矢量的振动方向与磁矢量的振动方向互相垂直,且 E 、 B 均垂直于光的传播方向,它们三者方向上的关系如图 1-1 所示。

实验表明,光对人眼的视觉,胶片的感光及在其它一般光学现象中起主要作用的是电矢量 E 。因此习惯上把电矢量叫做光矢量。由图 1-1 可知,电矢量振动方向和传播方向垂直,因此光波是一种横波。

(一) 单色平面波

1. 平面波

在光波场中,光波位相相同的空间各点所连成的面叫波面,也叫波阵面或同相面。光波的波面是平面的,这种波叫平面波。例如,将一个点光源放置在一个凸透镜的焦点上,如图 1-2 所示,则通过透镜后的光波是平面波。或者离点光源很远处整个波面上的很小一

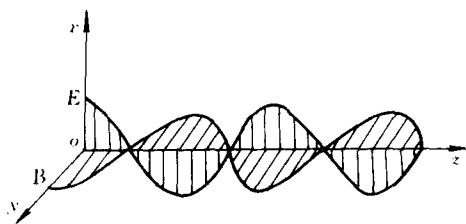


图 1-1 电磁波的传播

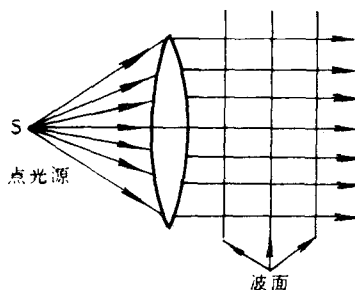


图 1-2 平面波

部分可以近似看作平面波(如太阳发出的光波到达地球表面时,波面的很小一部分可以近似看作平面波)。

平面波在均匀介质中传播的特点是其波面是彼此平行的平面,且在传播中如介质不吸收,则波的振幅保持不变。

2. 单色平面波

具有单一频率的平面波叫单色平面波。实际上的单色波都是准单色波。

理想单色平面波——简谐波(余弦波或正弦波)是最简单、最重要的一种波。因为由傅里叶分析可知任何复杂的波都可以分解为一系列不同频率的简谐波,所以讨论它是具有实际意义的。

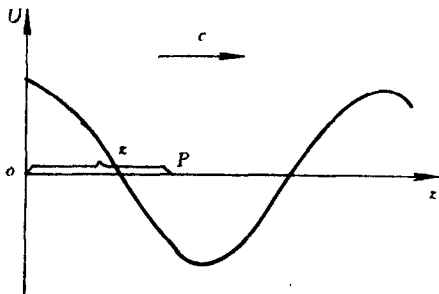
设在真空中电磁波的电矢量 E 在坐标原点 o 沿 x 方向作简谐振动。其频率为 ν , 圆频率 $\omega = 2\pi\nu$, 当 $t=0$ 时初位相为零, 则 E 的振动方程为

$$E = E_0 \cos 2\pi\nu t \quad (1-1)$$

为简便起见, 上式可用标量形式表示为

$$E = E_0 \cos 2\pi\nu t \quad (1-2)$$

其中 E_0 为电矢量的振幅。设该振动以速度 c 向 z 方向传播, 在波场中 z 轴上的任一点 P , 当振源的振动传播到该点时, 也作简谐振动。由于光波以有限的速度 c 向前传播, 所以 P 点的振动状态比参考点(原点)的振动状态在时间上落后 $\tau = z/c$ (z 为 P 点离参考点 o 的距离)。这就是说, o 点的振动状态经时间 τ 以后恰好传到 P 点。如图 1-3 所示。因此 P 点的振动方程容易写出:



$$E = E_0 \cos \omega(t - \tau) = E_0 \cos \omega(t - \frac{z}{c}) \quad (1-3)$$

图 1-3 振动状态的传播

由于 P 点的位置是任意选取的, 所以此方程是代表波场中任一点的振动状态, 它叫简谐波方程(也叫余弦波方程), 它是一个时间和空间的二元函数。简谐波方程(1-3)又可改写成如下的形式:

$$E = E_0 \cos 2\pi\nu(t - \frac{z}{c}) = E_0 \cos(\frac{2\pi t}{T} - \frac{2\pi z}{\lambda}) \quad (1-4)$$

从式(1-4)可以看出光波具有时间周期性和空间周期性。时间周期为 T , 空间周期为 λ (即光波长); 时间频率为 $1/T$, 空间频率 $1/\lambda$; 时间角频率 $\omega = 2\pi\nu = 2\pi/T$, 空间角频率(或波数)的大小为 $|K| = 2\pi/\lambda$ 。波矢 K 是一个矢量, 它的方向就是沿光线传播方向。式(1-4)可进一步写作

$$E = E_0 \cos(\omega t - Kz) \quad (1-5)$$

式中光线传播的方向就是 z 方向, 所以波矢可用标量。其中 $(\omega t - Kz)$ 叫做振动的位相, 当 $t=0$ 时, 位相 $-Kz$ 叫做初位相。

简谐波代表一个均匀平面波。它表示在垂直于传播方向 z 的任一平面内(即当 z 位置确定时)所有该平面内的各点, 振动的位相在任何时刻均相同是一个同相面。

3. 平面波的复数表示形式

为了运算方便, 常把平面波公式(1-5)写成复数形式。由数学中的欧拉公式:

$$e^{i\alpha} = \cos\alpha + i\sin\alpha$$

故公式(1-5)可写为

$$E = R_e[E_0 e^{i(\omega t - Kz)}]$$

式中 $R_e[\]$ 表示取 $[\]$ 中的实数部分。为简略起见,在运算中只要记住最后结果取复数的实数部分,也可以将 R_e 符号省去,直接写成:

$$E = E_0 e^{i(\omega t - Kz)} \quad (1-6)$$

或 $E = E_0 \exp[i(\omega t - Kz)]$

上面二式就是单色平面波的复数表示形式。在 $e^{i(\omega t - Kz)}$ 中,虚指数部分表示振动的位相。

在光学中知道,光强与光矢量的平方成正比,即 $I \propto E^2$ 。由于光的频率很高(可见光在 10^{14} Hz 量级),用通常的光探测器测量到的只是光强 I 的平均值 \bar{I} ,即

$$\bar{I} \propto \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} E^2 dt = \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} E_0^2 \cos^2(\omega t - Kz) dt = \frac{E_0^2}{2}$$

所以平均光强与相应的光矢量的振幅平方成正比,即 $\bar{I} \propto E_0^2$ 。在实际应用中,主要考虑光的相对强度,所以上式经常写成:

$$I = E_0^2 \quad (1-7)$$

认为比例系数为 1,且只要记住测量的是平均光强就可直接有 I 代替 \bar{I} 。

(二) 光偏振态

光的偏振是指光振动方向相对于光波传播方向具有不对称性。在与光传播方向垂直的二维空间里,光振动有各式各样的振动状态,称为光的偏振态。常见的偏振光有椭圆偏振光、圆偏振光、线偏振光、部分偏振光和自然光。

1. 椭圆偏振光

设有一列单色平面光波沿 z 轴传播,该单色平面光波电矢量的两个分量为

$$\begin{aligned} E_x &= E_{ox} \cos(\omega t - Kz) \\ E_y &= E_{oy} \cos(\omega t - Kz + \delta) \end{aligned} \quad (1-8)$$

式中, δ 是 E_x 与 E_y 两个分振动之间的周相差; E_{ox} 与 E_{oy} 分别为两个分振动的振幅。

在光波传及的某一点处, z 为一定值,电矢量的端点坐标 (E_x, E_y) 随时间 t 变化,其轨迹方程可由式(1-8)中消去参量 t 而导出:

$$\left(\frac{E_y}{E_{oy}}\right)^2 + \left(\frac{E_x}{E_{ox}}\right)^2 - 2 \frac{E_x E_y}{E_{ox} E_{oy}} \cos\delta = \sin^2\delta \quad (1-9)$$

这是一个椭圆方程。椭圆的形状和空间方位,以及电矢量端点在描绘椭圆时的旋转方向,均由两分振动的振幅 E_{ox} 、 E_{oy} 和周相差 δ 的取值所决定,如图 1-4 所示。

当 δ 为 $\pi/2$ 的奇数倍,式(1-9)简化为

$$\frac{E_y^2}{E_{oy}^2} + \frac{E_x^2}{E_{ox}^2} = 1 \quad (1-10)$$

此时,椭圆主轴与坐标轴 ox 重合。

按照习惯,逆着光的传播方向去看,如电矢量端点按顺时针方向描绘椭圆,称为右旋椭圆光;如电矢量端点按逆时针方向描绘椭圆,称为左旋椭圆光。

2. 线偏振光

光波传播过程中,若其电矢量的振动始终保持在同一平面内,即由光的传播方向和振动方向所组成的振动平面在传播中保持不变,称为平面偏振光。因其电矢量在与传播方向互交

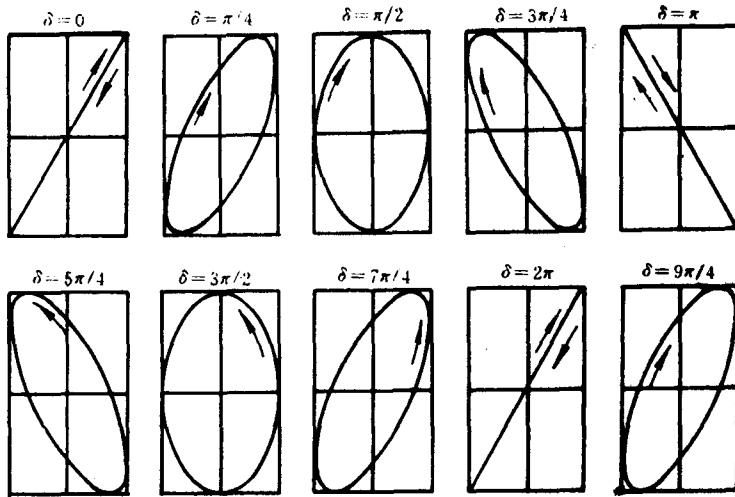


图 1-4 周相差对椭圆偏振光的影响

的平面上投影为一直线, 又称线偏振光。

线偏振光可视为椭圆偏振光的特例。在式(1-9)中, 当 E_x 与 E_y 两个分振动的周相差 δ 为 π 的整数倍, 电矢量端点的轨迹方程简化为

$$\frac{E_y}{E_x} = \pm \frac{E_{oy}}{E_{ox}} \quad (1-11)$$

这时, 椭圆变为直线。

在与传播方向垂直的 xoy 面上, 沿任意方向振动的线偏振光, 可以分解为 E_x 与 E_y 两个正交的分振动。这两个分振动不是同相(I、III象限), 就是反相(II、IV象限)。

3. 圆偏振光

圆偏振光也可视为椭圆偏振光的一个特例。在式(1-9)中, 当 $E_{ox} = E_{oy}$ 且周相差为 $\pi/2$ 的奇数倍时, 有

$$E_x^2 + E_y^2 = E_{ox}^2 \quad (1-12)$$

这时, 椭圆变为圆。

圆偏振光的特点是电矢量的瞬时值大小不变, 而以光波圆频率为角速度 ω 在垂直于传播方向的平面上匀速转动。其中, E_y 超前于 $E_x \pi/2$, 即 $\delta = \pi/2$ 时, 为右旋圆偏振光, 简称右圆光; E_y 滞后于 $E_x \pi/2$, 即 $\delta = -\pi/2$ 或 $3\pi/2$ 时, 为左旋圆偏振光, 简称左圆光。

二、光 子

前面已指出, 当光和物质作用时, 光的粒子性就表现得较为明显。这时, 往往把光当作一个一个的粒子看待。由物理学中知道, 在真空中一个光子的能量为 ϵ , 动量为 P , 则它们与光波的频率 ν , 波长 λ 之间有如下数值上的关系:

$$\epsilon = h\nu \quad (1-13)$$

$$P = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda} \quad (1-14)$$

式中 $h = 6.63 \times 10^{-34} \text{ (J} \cdot \text{s)}$ 焦耳·秒, 叫做普朗克常数。实际上光是由大量光子组成的光子流。光的能量就是光子能量的总和。当光与物质(原子、分子)交换能量时, 光子只能整个地被原子吸收或发射。

式(1-13)、式(1-14)把表征粒子性的能量 ϵ 和动量 P 的物理量与表征波动性的频率 ν 和波长 λ 联系起来, 体现了光的波粒二象性的内在联系。光的频率越高, 光子的能量就越大。红外光与可见光相比, 其频率较低, 故它的光子能量就较小。可见光、紫外光、X 射线、 γ 射线的频率依次增高, 相应的光子能量也逐渐增大。

注意: 光子的动量 P 是一个矢量, 它的方向就是光子运动的方向即光的传播方向。

三、光在光纤介质中的传播

(一) 光纤的结构

普通光纤是一种透明的圆柱形细丝, 它的中间是折射率较高的透明介质, 称为光纤芯, 外面一层为折射率较低的透明介质, 称为包层。光纤按其折射率在径向的不同分布可分为阶跃光纤和渐变折射率光纤或梯度光纤。其径向折射率分布曲线如图 1-5 所示。图中 n_1 为纤芯的折射率, n_2 是包层的折射率。实用的光纤除了光纤芯和包层外, 为了使光纤有足够的强度, 在包层外一般涂有环氧树脂和硅胶保护层, 并在外面加上套管。下面讨论光在阶跃光纤中的传播。

(二) 阶跃光纤中子午光线的分析

在光纤中如果某光线的传播路径始终在同一平面内, 则称之为子午光线, 包含子午光线的平面称为子午面。对于圆柱形光纤, 子午面就是包含圆柱体轴线的平面。

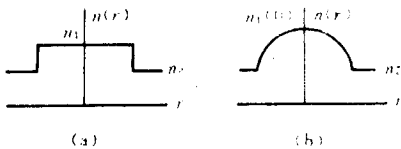


图 1-5 光纤的径向折射率分布

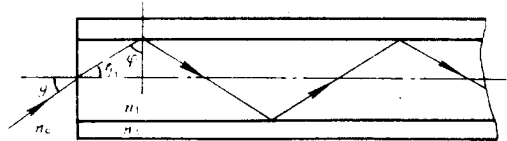


图 1-6 子午光线的传播

如图 1-6 所示, 设一子午光线以入射角 θ 入射到光纤的端面, 假设其到达光纤芯和包层界面上时满足全反射条件, 则依靠不断的全反射该光线即可在光纤中传输。根据折射定律

$$\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta} = \frac{n_0}{n_1} = \frac{1}{n_1} \quad (1-15)$$

式中, n_0 为空气折射率 ($n_0 = 1$); n_1 为光纤芯折射率。

由式(1-15)得

$$\sin \theta = n_1 \sin \theta_1 = n_1 \cos \varphi \quad (1-16)$$

要在界面上满足全反射条件, 必须满足

$$\sin \varphi > \frac{n_2}{n_1}$$

即

$$\cos\varphi < \sqrt{1 - \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2} \quad (1-17)$$

式中, n_2 为光纤包层的折射率。将式(1-17)代入式(1-16)得到子午线在光纤中传输的条件为

$$\sin\theta < \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (1-18)$$

式(1-18)反映了能在光纤内部传输的子午光线在光纤端面的入射角的范围。也就是说, 要使子午光线能在光纤中传输, 其入射角 θ 有一极限值 θ_M , θ_M 满足

$$\sin\theta_M = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$

只有入射角 $\theta < \theta_M$ 的子午光线方能在光纤中传输。 $\sin\theta_M$ 即称为光纤的数值孔径, 记为 NA。即

$$NA = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (1-19)$$

定义

$$\Delta = \frac{n_1^2 - n_2^2}{2n_1^2} \approx \frac{n_1 - n_2}{n_1}$$

Δ 为光纤的相对折射率差, 则 NA 又可表示为

$$NA = n_1 \sqrt{2\Delta}$$

数值孔径反映了光纤的集光本领, 数值孔径越大, 光纤对子午光线的集光本领也越强。

(三) 传播模式

在前面的分析中, 主要采用了几何光学的射线理论, 这在光纤的直径比入射光波长大的情况下才能有较好的近似, 但当光纤的直径小到与入射光波长接近时, 用射线理论得到的结果是不合适的, 此时, 必须采用波动理论才能得到比较精确的结果。

波动理论就是将光纤看成圆柱形介质波导, 将光当作电磁波, 用电磁场理论的知识求出在光纤中传输的各电磁波分量。因此, 用波动理论分析光在光纤中的传输情况, 实际上就是应用边界条件求解麦克斯韦方程的过程。由于这个求解过程比较复杂, 所以在这里不详细介绍, 只引入光纤中传播模式的概念。

1. 传播模式的定义

光在光纤中传输, 实际上就是交变电场和交变磁场在光纤中传输, 在传输中电磁场的不同分布形式称为模式。在光纤中各种不同模式的名称仍沿用电磁场理论中的标准称谓。由于光纤是圆柱形波导, 故这里采用圆柱坐标。

(1) TE_{mn} 模 在轴向只有磁场分量 H_z , 而在横截面上只有电场分量 E_ϕ, E_r , 这种模式又称为横电波, 记为 TE_{mn} 模, 其中 m, n 均为整数, 分别表示 ϕ 方向和 r 方向的波节数。

(2) TM_{mn} 模 在轴向只有电场分量 E_z , 而在横截面上只有磁场分量 H_ϕ, H_r , 这种模式又称为横磁波, 记为 TM_{mn} 模。

(3) HE_{mn} 模和 EH_{mn} 模 若在轴向既有电场分量又有磁场分量, 则称为混合模。当电场分量占优势而磁场分量较弱时, 混合模记为 EH_{mn} 模, 反之则记为 HE_{mn} 模。

通常, 将能够约束在光纤芯中传输的所有电磁波模式统称为导入模或芯模, 能约束在包层范围内传输的模式称为包层模, 而逸出光纤包层的模式称为消逝模。

2. 特征方程的解

电磁波在光纤中传输时, 其电场强度和磁场强度应满足麦克斯韦方程。在各向同性均匀透明介质中, 麦克斯韦方程可表示为

$$\begin{cases} \nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \\ \nabla \times \mathbf{H} = \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \\ \nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \\ \nabla \cdot \mathbf{H} = 0 \end{cases}$$

式中, \mathbf{E} 为电场强度; \mathbf{H} 为磁场强度; \mathbf{D} 为电位移; \mathbf{B} 为磁感应强度。

假设电磁场为简谐振荡的形式, 则麦氏方程可简化为

$$\begin{aligned} \nabla \times \mathbf{E} &= -j\omega\epsilon\mu_0\mathbf{H} \\ \nabla \times \mathbf{H} &= j\omega\epsilon\mathbf{E} \end{aligned}$$

式中, ϵ 为介电常数; μ_0 为真空磁导率; ω 为角频率。由此可导出, 在直角坐标系中, \mathbf{E} 和 \mathbf{H} 在 x, y, z 方向的分量均满足下列传播方程

$$\nabla^2\psi + \omega^2\epsilon\mu_0\psi = 0 \quad (1-20)$$

ψ 代表 \mathbf{E}, \mathbf{H} 在 x, y, z 三个方向的各个分量。式(1-20)又称为标量的赫尔姆兹(Helmholtz)方程。

假设圆柱形波导在轴向(z 方向)是无限的, 电磁场在 z 方向以速度 v_z 传播, 则在圆柱坐标系中, \mathbf{E} 和 \mathbf{H} 的每一个分量均可表示为

$$\begin{aligned} \psi(\gamma, \phi, z, t) &= \psi(\gamma, \phi) \exp\left[j\left(\omega t - \frac{\omega}{v_z}z\right)\right] \\ &= \psi(\gamma, \phi) \exp[j(\omega t - \beta z)] \end{aligned} \quad (1-21)$$

$\beta = \omega/v_z$ 称为电磁波在 z 方向的传播常数, β 又可表示为

$$\beta = K_0 n \cos\theta$$

K_0 称为自由空间的波数量, 即

$$K_0 = \frac{2\pi}{\lambda_0}$$

式中, n 为介质折射率; λ_0 为入射光在真空中的波长; θ 为光传播方向与 z 轴的的夹角。

由于在圆柱坐标中, 只有 z 方向的电磁场分量才能满足标量的赫尔姆兹方程, 故将 E_z 和 H_z 以式(1-21)的形式代入式(1-20), 采用变量分离的方法, 可以解出 E_z 和 H_z 的表达式。

对于阶跃折射率光纤, 要使电磁波能在光纤中传播, 其在光纤芯中必须为振荡形式的驻波, 而在包层中应为指数衰减形式的衰减波。为了使 E_z 和 H_z 在光纤芯和包层中的解满足这个条件, 必须保证

$$n_2^2 K_0^2 < \beta^2 < n_1^2 K_0^2$$

即

$$n_2 < \frac{\beta}{K_0} < n_1 \quad (1-22)$$

将 E_z 和 H_z 代入圆柱坐标下的麦氏方程, 并根据式(1-22)的条件, 即可解出各横向电磁场分量 E_x, E_y 和 H_x, H_y 在光纤芯和包层中的表达式。

将电磁场在光纤芯和包层边界连续的条件代入后, 令系数行列式等于零, 便可得到满足方程有解的特征方程为