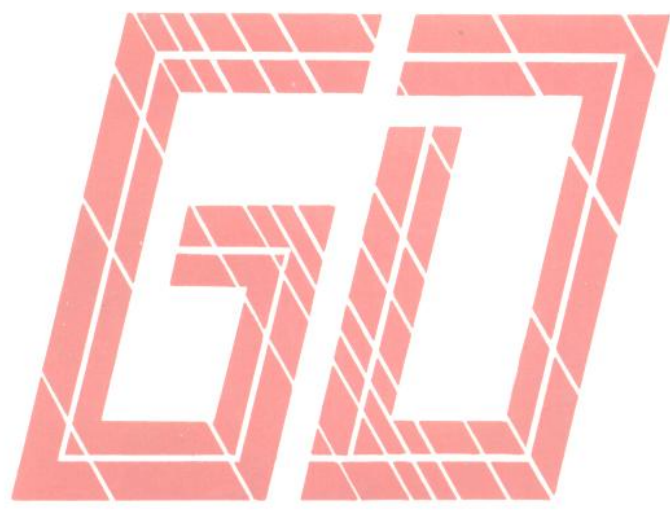


光  
电  
检  
测  
技  
术

# 光电 检测 技术

浙江大学 钱浚耀 郑坚立 编著



机

3.61  
392

社

机械工业出版社

73.61  
892

# 光电检测技术

浙江大学 钱浚霞 郑坚立 编著



机械工业出版社

(京) 新登字054号

D032/27

本书较系统全面地介绍了光电检测技术。内容包括光的基础知识、常用光源和光电探测器件、光电检测系统的组成、特种光电器件及其应用和光导纤维传感器。全书围绕热辐射光源、发光二极管和激光器；光电导器件、光电二极管、光电三极管、光电器件阵列、电荷耦合器件 (CCD)、光电位置敏感器件 (PSD)、色敏器件；组成光电检测系统的一些方法及其应用；光导纤维传感器以及各种机械量、热工量、状态量等的光电检测技术作了介绍。并附有少量国内外光电探测器件产品目录。

在特种光电器件及其应用、光电检测系统的组成和光纤传感器的介绍中，作者结合多年来的科研和教学作了较为深入细致的叙述，这是本书的重点。

本书内容全面、新颖，既有理论分析，又更注重实用。可供从事非电量电测工作的科技人员、高校师生使用，也可作为高校有关专业的选修课教材。

## 光电检测技术

浙江大学 钱浚霞 郑坚立 编著

\*

责任编辑：贡克勤 版式设计：冉晓华

封面设计：肖 晴 责任校对：熊天荣

责任印制：路 琳

\*

机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄南街一号)

邮政编码：100037

(北京市书刊出版业营业许可证出字第 117 号)

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

\*

开本 787×1092<sup>1/16</sup>·印张 15·字数 368 千字

1993年4月北京第1版·1993年4月北京第1次印刷

印数 0 001—2 050·定价：15.60元

\*

ISBN 7-111-03522-4/TN·64

## 前 言

随着光电子学和半导体技术的发展，光电器件发展迅速，各种新型光电探测器应运而生，为光电检测技术的发展提供了良好的条件。光电检测技术已广泛地应用于工业、医学、空间科学等领域，还孕育着更多更重要的可能应用领域，因而受到各国科技界的重视，纷纷把它作为今后的重点发展项目之一。我们编著的这本书，全面介绍了光电检测技术，并以新型光电器件和新颖检测技术为重点。全书叙述力求概念清楚易懂，既有光电检测技术中的基本原理和方法，又有检测具体参数的实例。以满足较多读者的需要，并愿借此以推动光电检测技术的普及和发展。

作者从事光电检测技术的科研和教学已许多年，收集了较丰富的资料，积累了许多实践经验。五年前编著了本书的第一稿(油印本)，并作为浙江大学科学实验仪器工程学系检测技术及仪器专业的教材。通过这五年来的教学实践和科研项目的进行，对第一稿作了修改和充实。书中第一、三章由钱浚霞老师编写，第四、六章由郑坚立老师编写，第二、五章由两位老师合作编写。本书对学习和研究光电检测技术都有一定的参考价值，它既可作为高等院校有关专业的选修课教材，也能作为高校、科研单位及工厂的有关工程技术人员进行科研或生产提供一定的参考和启发。

本书在内容或文字方面若有不当、遗漏之处，望读者不吝赐教为感。

作者

1991年于杭州，浙江大学

# 目 录

## 前言

|                                     |    |
|-------------------------------------|----|
| 第一章 概述 .....                        | 1  |
| 第一节 引言 .....                        | 1  |
| 第二节 光电检测系统的基本构成 .....               | 1  |
| 第三节 光电检测的工作原理及基本<br>结构型式 .....      | 2  |
| 第四节 光电检测技术的发展趋势 .....               | 5  |
| 第二章 光的基础知识 .....                    | 7  |
| 第一节 光的本质 .....                      | 7  |
| 第二节 光在介质表面的反射和折射 .....              | 8  |
| 第三节 光与物质的相互作用——光<br>的吸收、色散和散射 ..... | 10 |
| 第四节 光的干涉、衍射和偏振 .....                | 12 |
| 第五节 光的辐射及其基本度量单位 .....              | 16 |
| 第三章 常用光源和光电探测器件 .....               | 22 |
| 第一节 光源 .....                        | 22 |
| 第二节 常用光电探测器件基本性能<br>参数 .....        | 29 |
| 第三节 光电导器件 .....                     | 35 |
| 第四节 光伏效应器件 .....                    | 42 |
| 第五节 光电发射器件 .....                    | 65 |

## 第四章 光电检测的一般方法及

|                         |     |
|-------------------------|-----|
| 应用 .....                | 71  |
| 第一节 光电检测的基本方法 .....     | 71  |
| 第二节 物体位置及尺寸的检测 .....    | 84  |
| 第三节 辐射温度的检测 .....       | 103 |
| 第四节 溶液浓度的检测 .....       | 108 |
| 第五章 特种光电器件及其应用 .....    | 113 |
| 第一节 光电二极管及光电三极管阵列 ..... | 113 |
| 第二节 电荷耦合器件及图象传感器 .....  | 117 |
| 第三节 光电阵列器件在检测中的应用 ..... | 128 |
| 第四节 光电位置敏感器件及其应用 .....  | 135 |
| 第五节 半导体色敏器件及其应用 .....   | 146 |
| 第六章 光导纤维传感技术 .....      | 151 |
| 第一节 光导纤维的基础知识 .....     | 151 |
| 第二节 光纤传感器的概念与原理 .....   | 171 |
| 第三节 机械量的光纤传感技术 .....    | 187 |
| 第四节 过程控制量的光纤传感技术 .....  | 206 |
| 第五节 电磁量的光纤传感技术 .....    | 222 |
| 第六节 化学量的光纤传感技术 .....    | 227 |
| 参考文献 .....              | 233 |

# 第一章 概 述

## 第一节 引 言

光电检测技术是光学与电子学技术相结合而产生的一门新兴检测技术。它是利用电子技术对光学信息进行检测,并进一步传递、储存、控制、计算和显示等。

随着半导体工业的迅速发展,研究光电器件的光电子技术取得了巨大进展,各种新型光电探测器件应运而生,如:电荷耦合器件、光位置敏感器件、光敏阵列器件等。不仅有一维参量的光电探测器件,而且有二维参量甚至三维参量的光电探测器件。光导纤维技术的开发更为光电检测技术提供了一种新方法,扩大了检测领域。所有这一些使光电检测技术已在各个领域各个部门得到了广泛的应用。例如,在精密计量、工业过程测量与控制、设备的故障诊断、机器人技术以及国防工业等方面都已得到应用。由于它是一种非接触式的检测方法,并且检测速度快、检测精度高;能够自动、连续地进行检测;可以进行遥测;便于自动记录;可以与电子计算机联接进行处理;可采用微处理机做成智能仪器等,因此,很快地在各个科学技术部门得到广泛的应用。特别是现代科学技术的检测都是由静态向动态发展,以及机器人技术的大力开发,更为光电检测技术开拓了广阔的应用前景。

光电检测技术从原理上讲可以检测一切能够影响光量或光特性的非电量,例如,位移、振动、力、转矩、转速、温度、压力、流量、液位、湿度、液体浓度、混浊度、成分、角度、表面粗糙度、乃至图象等。通过光学系统把待检测的非电量信息变换成为便于接收的光学信息,然后用光电探测器件将光学信息量变换成电量,并进一步经电路放大、处理等,达到电信号输出的目的。这些信息变换技术和电信号处理技术便是光电检测技术的主要内容。它们包括各种类型的光学系统,及其相应的光源与光学器件,种类繁多的功能各异的光电探测器件。由于篇幅的限制,并考虑到光学系统和光学器件方面的知识已有专门的课程或书籍介绍,本书不再介绍。本书将就光的基础知识、常用光源和光电探测器件、光电检测的一般方法及应用、特种光电器件及其应用、光导纤维检测技术等方面的内容进行介绍。

## 第二节 光电检测系统的基本构成

作为一个完整的检测系统,应包括信息的获得,变换、处理和显示等几个部分。因此,具体来说,光电检测系统应由光电传感器、处理电路和显示控制等三个基本部分组成,如图1-1所示。

显然,框图中的光电传感器是检测系统的核心部分。它以光为媒介,以光电探测器件为手段,将各种待检测量变换成电量(电流、电压或频率)。它将决定整个检测系统的灵敏度、精度、动态响应等。处理电路的作用是将光电传感器输出的微弱电信号进行放大、处理(解调、数/模或模/数转换)、运算等,以适应后续显示、控制或执行机构的要求。

光电传感器通常都由光源、光学系统和光电探测器三部分组成,它们间的关系如图1-2

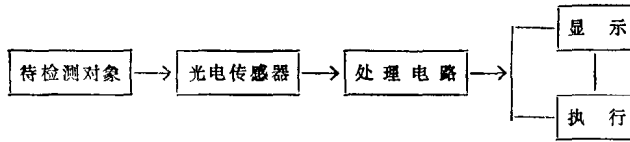


图1-1 光电检测系统的基本组成

所示。用于光电传感器中的光源可采用白炽灯、气体放电灯、半导体发光器、激光器等器件。光学系统的器件可以是透镜、滤光片、光阑、光楔、棱镜、反射镜、光通量调制器、光栅等。光电探测器有光敏电阻、半导体光电管、光电池、真空光电管和光电倍增管、电荷耦合器件、光位置敏感器件等。

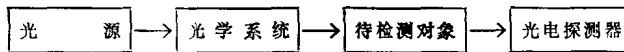


图1-2 光电传感器方框图

总体来看，光电传感器具有许多优点，当然也存在一些缺点，分述如下：

优点：①非接触式检测。不触及被测对象，不扰乱被测系统，无损耗。②响应速度高。通常响应时间为 $10^{-1} \sim 10^{-9}$  s。③检测对象范围宽。配用光学零件则可从微小面积到大面积，而且不仅可见光，紫外光、红外光均可探测。④大量的相关应用。不仅对光，还能转用于检测液面、位置、压力及其它方面。

缺点：①沾污影响大，必须采取措施，否则使用受限制。②外界干扰光影响大，背景光及外干扰光的影响使信噪比变差，但可采取措施减至最小。③使用温度范围小，不能用在高温。

光电检测系统中处理电路的任务主要是解决两个问题：一是实现对微弱信号的检测；二是实现光源的稳定化。其它方面与别种检测技术中的测量电路无多大区别。

### 第三节 光电检测的工作原理及基本结构型式

光电检测是以光信息的变换为基础，它有两种基本工作原理。

#### 一、把待检测量变换为光信息量

它是以光通量的大小来反映待检测量的大小。光电探测器的输出往往与入射到它的光敏面上的光通量成正比。所以，光电探测器的光电流大小可以反映待检测量的大小，即光电流  $I$  是待检测信息量  $Q$  值的函数：

$$I = f(Q) \quad (1-1)$$

这是一种模拟量信息变换。

显然，光电探测器输出的光电流  $I$  的大小不仅与待检测信号的大小有关，而且与光源的强度、光学系统和光电探测器的性能有关。为了使光电流  $I$  仅是待测信号信息量  $Q$  的单值函数，首先要求光源的发光强度稳定，其次要求光电探测器的特性稳定。因此，基于这种工作原理的光电探测器，必须相应地采取一些稳定化措施，例如，采用差动式电路；光源供电电源的稳定化；光电探测器的筛选；光学系统和机构结构的可靠性设计等。

## 二、把待检测量变换为光信息脉冲

它是**以光脉冲或条纹数的多少**来反映待测量的大小，光电探测器的输出为低电平和高电平两个状态组成的一系列脉冲数字信息，这些数字信息量  $T$  是待测信息量  $Q$  的函数：

$$T = f(Q) \quad (1-2)$$

这是一种模/数信息转换。

显然，数字信息量只取决于光通量的有无，而与光通量的大小无关。因此，基于这种工作原理的光电检测装置，对光源和光电探测器的要求较低，只要求有足够的光通量能区分“0”和“1”两个状态即可。

基于上述两种基本工作原理，可以组成下面几种光电变换结构形式

### (一) 反射式

如图1-3所示，由待检测对象把光反射至光电接收器。反射面的状态可以呈光滑的镜面，也可以呈粗糙状。相应地，光的反射形式有镜面反射和漫反射之区别。它们反射的物理性质不相同，在光电检测技术中的应用机理也就不同。镜面反射的光按一定的方向反射，它往往被用来判断光信号的有无。测量转速就是一个典型的应用实例。如图1-4所示，轴转动一周，光电探测器4就获得一个由光源1发出的反射光的脉冲，此脉冲数就反映了轴的转速。为了加强光在待检测物上的反射作用，往往在待测物体上另加反射镜，图1-4中的小平面镜3就是为了增强反射性能。所谓漫反射是指一束平行光照射到某种表面上时，光向各个方向反射出去的现象。因此，在漫反射处某一位置上的光电探测器只能接收到部分反射光，接收到的光通量大小与产生漫反射表面材料的性质、表面粗糙度及表面缺陷等有关。根据这一原理用来检测物体表面的外观质量。

这种光反射式检测原理，除上述应用实例外，光电测距、激光制导、直至电视摄像等，均属此种原理。

### (二) 透射式

光透过待检测物体，其中一部分光通量被待检测物吸收或散射，另一部分光通量透过待检物体由光电探测器接收，如图1-5所示。被吸收或散射的光通量的数值决定于待检测物的性质。例如，光透过均匀介质时，光被吸收，其吸收减弱的规律为

$$I = I_0 e^{-\alpha d} \quad (1-3)$$

式中， $I_0$ 为入射到待检测物介质表面的光通量； $\alpha$ 为介质吸收系数； $d$ 为介质厚度。

液体或气体介质的吸收系数  $\alpha$  与介质的浓度成正比。因此，当介质（待检测物）的厚度  $d$  一定时，光电探测器上接收到的光通量  $Q$  仅与待测介质的浓度有关。

应用这种透射式结构，可以用于检测液体或气体的浓度、透明度或混浊度；检测透明薄膜的厚度和质量；检测透明容器的疵病；测量胶片的密度等。

### (三) 辐射式

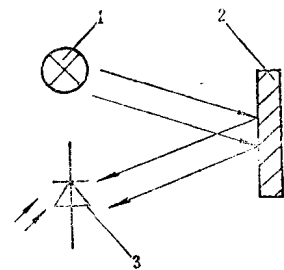


图1-3 反射式  
1—光源 2—待检测物  
3—光电探测器

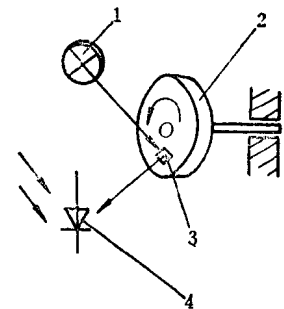


图1-4 转速测量原理图  
1—光源 2—转轴 3—小平面镜  
4—光电探测器



如图1-6所示，待检测物体 1 本身就是辐射源，它发出的辐射能强弱与待检测物 1 的性质（例如温度的高低）有关，用光电探测器 3 检测其辐射量的大小，就能确定待测量的大小。辐射高温计、火警报警器、热成像仪等均应用了这种辐射式变换形式。

(四) 遮挡式

待检测物遮挡部分或全部光束，或周期性地遮挡光束，如图1-7所示。根据被遮挡光通量的大小就可确定待检测物的大小，或者待检测物的位移量；根据被遮挡光束的次数就可确定待测物体的个数，或者待测物体的运动速度等，相应地可用于产品计数、光控开关以及防盗报警等。

(五) 干涉式

如图1-8所示，由光源 1 发出的光线经过透镜 2 照射到分束器 3（它可以是半透明半反射的平面镜或棱镜）上，经分光面把光线分成两路，一路  $a$  射向平面反射镜 4 作为参考光，

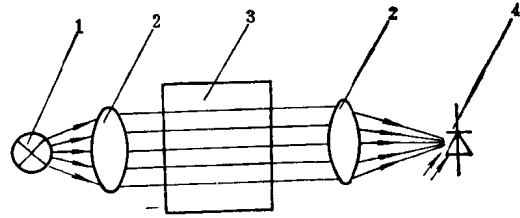


图1-5 透射式

1—光源 2—透镜 3—待测物体 4—光电探测器

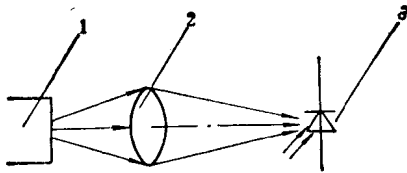


图1-6 辐射式

1—待检物 2—透镜 3—光电探测器

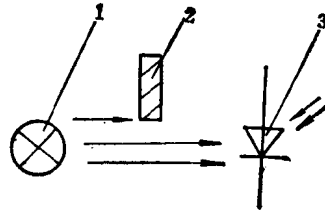


图1-7 遮挡式

1—光源 2—待检测物 3—光电探测器

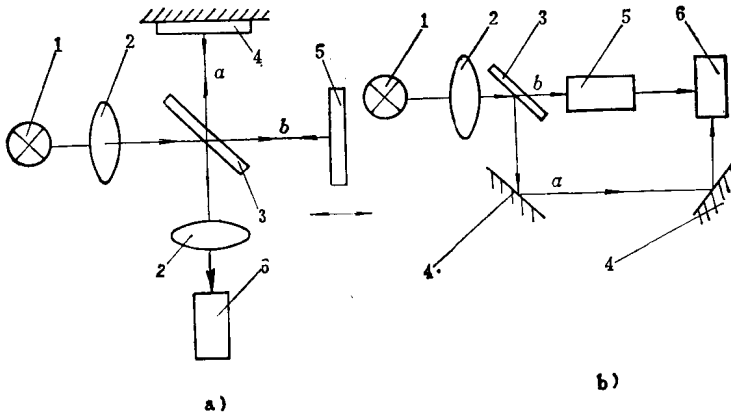


图1-8 干涉法

1—光源 2—透镜 3—分束器 4—反射镜 5—待测物体 6—光电探测器

另一路  $b$  射向待检测物 5，从待检测物中得到待测信息。例如，图1-8 a 中的待测信息可以是位移或振动等。图1-8 b 中的待测信息可以是待测物体折射率的变化，即浓度或成分变化的信息。光线  $a$  和  $b$  经过 4 和 5 后又一起射向光电探测器 6，在光电探测器上可检测到干涉条纹信号。

因此，干涉法可用于检测位移、振动、流体的浓度、折射率等。它的检测灵敏度和精度很高，动态范围亦大，但结构和检测电路复杂，成本亦高。

## 第四节 光电检测技术的发展趋势

科学技术可以说是由测量开始到测量结束，其测量目的是要获得关于研究对象的各种信息，以便根据所得的信息控制研究对象。随着现代科学技术的发展，在测量和控制方面，测量的对象显著增加，测量的要求越来越高，它们都要求迅速正确地获得多个不同性质的信息参量，对检测技术提出了非接触化、小型化、集成化、数字化、智能化等要求。非接触化正是光电检测技术的特点所在，其它几个方面的要求，随着光电子技术的发展以及各种新型光电探测器件的出现，也正在逐步实现中。

虽然光电检测技术的发展历史较长，发展水平也较高，但还方兴未艾，它种类繁多，并且由于信息处理功能的扩大和高速化，势必对光电检测技术寄予更大的希望。人们往往把计算机比作人的“大脑”，传感器比作人的“五官”。而在人的五个感觉器官中，当然数视觉的用途最大，中枢神经系统的信息大部分来自视觉，对于宝贵的东西往往用爱护“眼睛”一样来形容，可见其重要性。光电检测就相当于人的眼睛，并在某些方面已超过人的眼睛，例如灵敏度、精度、能检测的波长范围等。但在另外一些方面还逊于眼睛的功能，例如眼睛能同时辨认视场范围内一切物体的大小、形状、距离、颜色等，而光电检测技术只能反映单一或少量复合的信息。随着大规模集成电路的发展，数目众多的光电探测器件有规则地排列在整个面上，形成了相似于人眼视网膜的器件，使光电检测向人的眼睛靠近了一步。

迅速发展的半导体集成电路技术，可以将探测器件与电路集成在一个整体中，也可以将具有多个检测功能的器件集成在一个整体中。例如，将图形、物体等具有二维分布的光学图象转换成电信号的检测器件是把基本的光电探测器件组成许多网状阵列结构，即在一片半导体单晶片上形成几十万个光电探测器件。引人注目的电荷耦合器件(CCD)就是一种将阵列化的光电探测与扫描功能一体化的固态图象检测器件，它是把一维或二维光学图象转换成时序电信号的集成器件，能广泛应用于自动检测、自动控制，尤其是图象识别技术。今后光电检测技术的发展，将通过更高层次的集成化，不断向着具有二维或三维空间图形，甚至包含有时序在内的四维功能探测器件发展。应用这些器件就可实现机器人视觉或人工智能。

光导纤维传感器的出现，为光电检测技术小型化等开辟了广阔前景。光纤检测技术可以解决传统检测技术难以解决或无法解决的许多问题。例如，在噪声、干扰、污染严重的工业过程检测，或者在海洋、反应堆中，自动检测设备或智能机器人，必然会受到高压、高温、辐射、化学腐蚀等极端困难的条件下，光纤检测技术则具有独特的优越性。由于光信息传输的独特优点，光纤检测智能化将比其它检测技术更有吸引力，特别是小型集成光学元件与微计算机结合的智能化全光纤检测系统，其前途是无量的。此外，光栅和莫尔条纹的应用，对光电检测的数字化提供了有利条件。

从70年代以大规模集成电路为基础的微处理机问世后，迅速应用到了各种检测技术。由于微处理机具有数据的运算、处理、校验、逻辑判断、储存等功能，检测装置与它相结合，能实现原检测装置无法实现的许多功能。例如，能通过功能键送入的指令，按预先编制并在机内存储的操作程序，完成自校准、自调零、自选量程和自动检测等，从而可减小原检测装置的非线性及零位误差，提高了检测精度；又能按各参数之间的关系式，通过计算作参数变换，从而可以通过某些参数的测试而自动求出一系列其它有关的未知数，便于实现多参数测试；还能将测量得到的数据，根据误差理论对测得的数据进行计算，求出误差，并从测量结果中扣除，提高了测量精度。总之，随着微处理器技术的发展以及光电检测技术与它的紧密结合，光电检测技术将越来越智能化。作为机器人的视觉系统已提到议事日程上，它直接影响着机器人的发展和完善。

## 第二章 光的基础知识

### 第一节 光的本质

#### 一、光的两重性

几个世纪以来，关于光的本质一直是物理学中争论的一个主题。1860年麦克斯韦电磁理论建立后，才认识到光是一种电磁波，利用麦克斯韦理论能很好地说明光在传播过程中的反射、折射、干涉、衍射、偏振以及光在各向异性介质中的传播等现象。但在光与物质的相互作用方面，如物质对光的吸收、色散和散射等，上述理论仍不能给出令人满意的解释。1900年普朗克在研究黑体辐射的能量按波长分布这一问题时认为，谐振子辐射是不连续的，提出了辐射的量子论。1905年爱因斯坦在解释光电发射现象时提出了光量子的概念，从而使人们对光的本质有了进一步的认识。认识到光具有波粒两重性，设想光由分离的能团——光子（简称光子）组成。在光电发射效应中，实验发现光激发电子的初始动能只与入射光的波长（或频率）有关，而与入射光的强度无关；单位时间内激发的光电子数与入射光的强度成正比。这些现象难以用波动理论给予解释，而用粒子理论能得到圆满的解释。

#### 二、电磁波谱

麦克斯韦理论指出，光是一种电磁波，但它在整个电磁波谱中，只占有很狭的范围。电磁波也称电磁辐射，其重要的特征参数是波长（或频率），整个电磁波谱按波长排列。波长从 $0.01\sim 1000\mu\text{m}$ ，或频率从 $3\times 10^{12}\sim 3\times 10^7\text{Hz}$ 范围属于光学波段，它包括紫外辐射、可见光和红外辐射三部分（见图2-1）。通常，波长短于 $0.38\mu\text{m}$ 的是紫外辐射；波长从 $0.38\sim 0.78\mu\text{m}$ 的是可见光；波长从 $0.78\sim 1000\mu\text{m}$ 的是红外辐射。人眼能感觉到光有不同的颜色，实质上是波长不同的光在人眼中所引起的不同感觉。图2-2表示一个所谓标准观察者的眼睛对各种波长辐射的相对灵敏度。从图中看出，人眼对波长为 $0.55\mu\text{m}$ 的黄绿光反映最敏感。

#### 三、光子

按照光的粒子性，光由具有一定能量的光子组成。光子的能量与光的频率成正比，即

$$E = hf$$

式中， $h$ 为普朗克常数（ $h = 6.625 \times 10^{-34} \text{J}\cdot\text{s}$ ）。

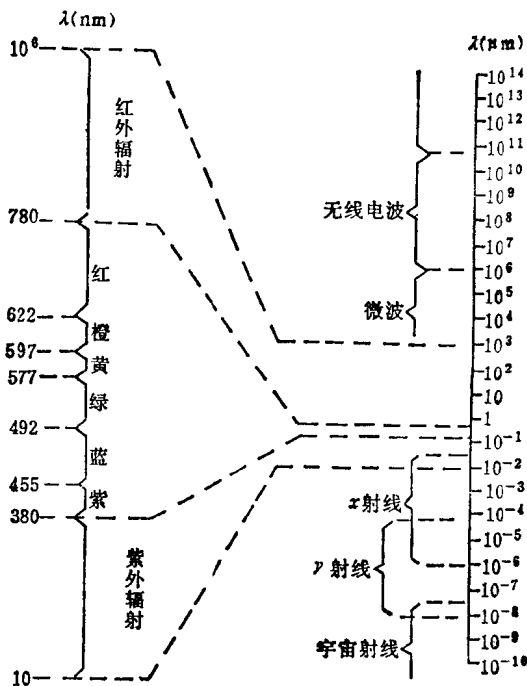


图2-1 电磁波谱

(2-1)

每个光子以速度  $c$  传播, 可以把光看作一个波群, 并想象它为一个频率为  $f$  的振荡, 相邻两峰间的振荡距离等于波长  $\lambda$ , 于是波长  $\lambda = c/f$ 。此时式(2-1)可写成

$$E = \frac{hc}{\lambda} \quad (2-2)$$

由式(2-2)可知, 光子的能量与波长有关, 如绿光光子比红光光子具有更多的能量。根据这个道理可知, 紫外辐射的能量比任何一种可见光的能量都大, 而红外辐射的能量比任何一种可见光的能量都小。

光在不同介质中的传播速度不等, 但总是低于光在真空中的传播速度。光在真空中的传播速度与在介质中的传播速度之比  $n$  称为该介质的折射率, 即

$$n = \frac{c}{v} \quad (2-3)$$

式中,  $n$  为物质的特征参数。

光不论在什么介质中传播, 其频率总是不变。因此, 在不同介质中, 光的波长不等。设  $\lambda_0$  和  $\lambda$  分别表示频率为  $f$  的光波在真空中和在折射率为  $n$  的介质中的波长, 则可得

$$\lambda_0 = n\lambda \quad (2-4)$$

但是, 除非特别注明, 凡提到光的波长, 通常均指真空中的波长。

在很多情况下, 由于光子数巨大, 故致使光的波动性占统治地位。例如  $1\text{ mW}$  的氦氖激光器每秒约发射  $10^{15}$  个光子, 使发射光束的大部分特征可用平面波理论解释。

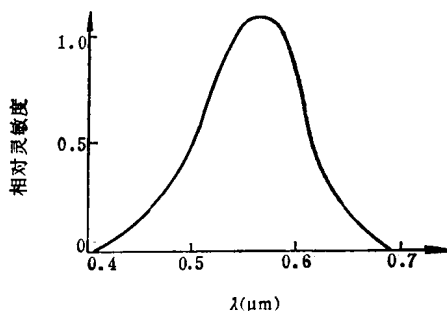


图2-2 人眼明视觉的标准光谱响应

## 第二节 光在介质表面的反射和折射

### 一、光在两透明介质分界面上的反射和折射

光在两透明介质分界面上的反射和折射, 实质上是光波的电磁场与物质的相互作用。反射光和折射光的传播方向与入射光入射角的关系就是我们熟知的反射定律和折射定律。现在讨论入射波、反射波和折射波的能量关系。我们知道, 平面波的光强度由下式给出

$$I = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\epsilon}{\mu}} A^2 \quad (2-5)$$

式中,  $\epsilon$  为介电系数,  $\mu$  为磁导率,  $A$  为平面波的振幅。

此式表示单位时间内通过垂直于传播方向的单位面积的能量值。如果入射波的强度记为  $I_1$ , 则每秒入射到分界面单位面积上的能量为 (参考图2-3)

$$E_1 = I_1 \cos\theta_1 = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\epsilon_1}{\mu_1}} A_1^2 \cos\theta_1$$

而反射波和折射波每秒从分界面单位面积带走的能量为

$$E_1' = I_1' \cos\theta_1 = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\epsilon_1}{\mu_1}} A_1'^2 \cos\theta_1$$

$$E_2 = I_2 \cos\theta_2 = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\epsilon_2}{\mu_2}} A_2^2 \cos\theta_2$$

式中  $I'_1$ 、 $I_2$ ——分别为反射波和折射波的强度。

因此，在分界面上反射波、折射波的能量流与入射波的能量流之比为

$$R = \frac{W'_1}{W_1} = \frac{I'_1}{I_1} = \frac{A_1'^2}{A_1^2} \quad (2-6)$$

$$T = \frac{W_2}{W_1} = \frac{n_2 \cos \theta_2 A_2^2}{n_1 \cos \theta_1 A_1^2} \quad (2-7)$$

式 (2-7) 中利用了对于非磁性介质的近似  $\mu_1 \approx \mu_2$ 。R 和 T 分别称为反射率和透射率。

可见光反射率随入射角变化的关系为

$$R_n = \frac{1}{2} \left[ \frac{\sin^2(\theta_1 - \theta_2)}{\sin^2(\theta_1 + \theta_2)} + \frac{\text{tg}^2(\theta_1 - \theta_2)}{\text{tg}^2(\theta_1 + \theta_2)} \right] \quad (2-8)$$

图2-4绘出了可见光在空气和玻璃分界面上反射时  $R_n$  随入射角变化的曲线。从曲线可以看出，可见光在  $\theta_1 < 45^\circ$  的区域内反射率几乎不变，约等于正入射（即  $\theta_1 = 0^\circ$ ）的值。而正入射时可见的反射率为

$$R_n = \frac{1}{2} \left[ \left( \frac{n_2 - n_1}{n_2 + n_1} \right)^2 + \left( \frac{n_2 - n_1}{n_2 + n_1} \right)^2 \right] = \left( \frac{n_2 - n_1}{n_2 + n_1} \right)^2 \quad (2-9)$$

由式 (2-9) 可知，折射率  $n_1$  和  $n_2$  的差值越大，其正入射的反射率也越大。对于空气和玻璃的界面，由于空气的折射率  $n_1 \approx 1$ ，玻璃的折射率  $n_2 \approx 1.5$ ，可得反射率  $R_n \approx 0.043$ ，即约有4%的光能量被反射。对于一些构造复杂的光学系统，即使是近于正入射下入射，但由于反射面过多，光能量的损失也是相当严重的。通常采用涂增透膜的方法来降低反射率。

如果光波从光密介质射向光疏介质 ( $n_2 < n_1$ )，根据折射定律  $\sin \theta_1 / \sin \theta_2 = n_2 / n_1 < 1$ ，当  $\sin \theta_1 > n_2 / n_1$  时，会有  $\sin \theta_2 > 1$ ，这是没有意义的。事实上，这时没有折射光存在，所有的光全部反射回第一介质，这种现象称为全反射。由于光能没有透射的损失，所以往往利用全反射来改变光线的传播方向。纤维光学和集成光学就是利用全反射来传光。图2-5所示是一根折射率为  $n_1$  的圆形直纤维芯，包围纤维芯的介质折射率为  $n_2$ ，如果  $n_1 > n_2$  且光线在纤维芯与周围介质分界面上的入射角  $\theta_1$  大于全反射临界角时，光线将不断地在纤维内全反射，由纤维的一端传播到另一端，纤维因而起着光波导的作用，被称为光导纤维。

## 二、光在金属表面上的反射

光在金属的清洁磨光表面上一般有着强烈的反射，这与金属中存在密度很大的自由电子有关（在  $1\text{cm}^2$  中电子数约为  $10^{22}$  的数量级），自由电子受到光波电磁场的强迫振动会产生次波，这些次波造成了强烈的反射波和传播到金属内的较弱的透射波。由于自由电子的密度如此之大，所以即使非常薄的金属片也能够把大部分入射光

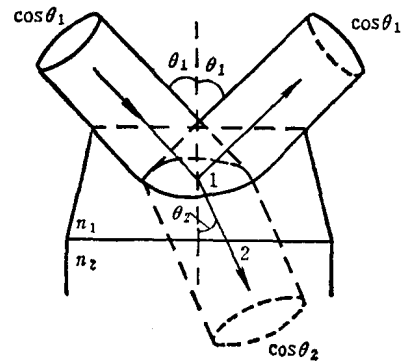


图2-3 光在两透明介质界面上的反射与折射

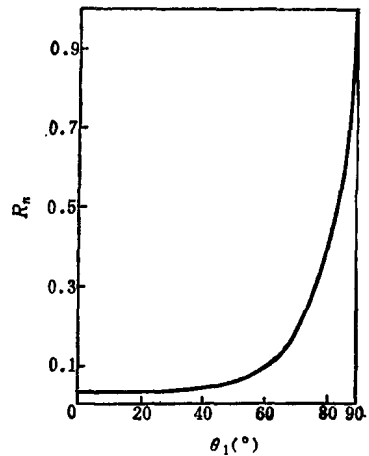


图2-4 可见光反射率随入射角的变化（玻璃折射率设为1.52）

反射回去，以及把进入金属内的透射光吸收掉。

各种金属反射光的能力不同，这在于它所包含的自由电子的密度不同，一般说来，自由电子密度越大(电导率越大)，反射本领也越高。对于同一种金属来说，入射光波长不同，反射率也不同。频率比较低的红外辐射，主要对金属中自由电子发生作用，而频率较高的可见光和紫外辐射，也可以对金属中的束缚电子发生作用。束缚电子有本身的固有频率，这频率正处在可见光和紫外辐射区，束缚电子的作用将使金属的反射能力降低，透射能力增大，呈现出非金属的光学性质。例如，银对于红光和红外辐射反射率很高(在90%以上)，而对于紫外辐射，反射率很低，在 $\lambda = 316\text{nm}$ 附近，反射率降到4.2%(图2-6)，相当于玻璃的反射，而透射能力则明显增大。铝的反射率随波长的变化比较平缓，对紫外辐射仍有相当高的反射率，这一特性和它的很好的抗腐蚀性，使铝常被用作反射镜的涂料。

金属表面的反射率除了与波长有关外，也与光的入射角有关。但是与电介质表面的反射不同，对于金属，不论在什么角度下反射，都不能使反射光成为全偏振。

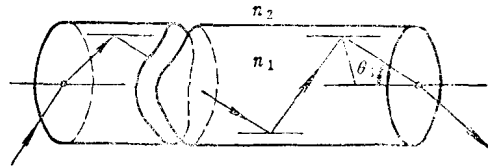


图2-5 光线在纤维内表面的全反射

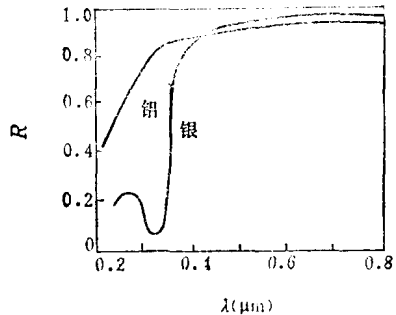


图2-6 银和铝反射率与波长的关系

### 第三节 光与物质的相互作用——光的吸收、色散和散射

#### 一、光的吸收和色散

导电介质和绝缘介质都可以引起光吸收现象。朗伯定律指出，当光在介质中传播时，由于介质对辐射能量的吸收作用，辐射光强将随传播距离作指数衰减。其表达式为

$$I = I_0 e^{-\alpha x} \quad (2-10)$$

式中， $I_0$ 为介质表面上的辐射光强； $x$ 为光在介质中传播的距离； $\alpha$ 为光的吸收系数。

图2-7所示为垂直入射时 $x = 1/\alpha$ 处的辐射光强，此处的光强 $I(x)$ 将降到外表面处辐射光强 $I(0) = I_0$ 的 $1/e$ ，即在区域 $(0, 1/\alpha)$ 内辐射光强被吸收了62.8%，只剩下约1/3的光强能继续传播。因此， $1/\alpha$ 是光在介质中透入深度的标志，吸收系数也就成为一个常用的常数。

吸收系数 $\alpha$ 是波长 $\lambda$ 的函数，这种函数关系称为吸收光谱。对不同的材料，吸收光谱是完全不同的。图2-8所示的是大气透过率 $I/I_0$ 与 $\lambda$ 的关系。由式(2-10)知道， $I/I_0 = e^{-\alpha x}$ ，只要 $x$ 一定，透过率便直接反映吸收系数 $\alpha$ ，因此可以用测量透过率

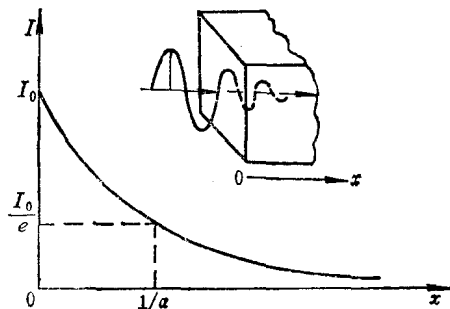


图2-7 垂直入射于介质的光辐射在介质中的衰减

来得到吸收系数。

吸收很强的波长范围称为吸收带，而吸收的最大值称为吸收峰。气体的吸收带一般较窄，固体、液体的吸收带较宽。

吸收系数  $\alpha$  与折射率  $n$  有关，其关系式为

$$\alpha = \frac{4\pi}{\lambda_0} n\eta \quad (2-11)$$

式中， $\eta$  称为吸收率或消光系数； $n$  和  $\eta$  都是  $\lambda$  的函数。

当某一介质的  $\alpha$  随波长不同而改变时，则光在该媒质中传播时，不同波长的光将被散开，这个现象被称为色散。为了表示介质折射率随波长变化的程度，可用色散率表示

$$\nu = \frac{dn}{d\lambda} \quad (2-12)$$

可见吸收与色散有很密切的关系。

## 二、光的散射

光通过介质时，由于种种原因使一部分光离开了原来的方向，这种现象称为散射。

在均匀介质中，光只能沿着折射光线的方向传播，即均匀介质不会产生光的散射。只有不均匀结构的介质，才能引起光的散射。按不均匀结构的性质，通常可以把散射分为三类：

① 介质中含有很大质点，其线度约等于光的波长，这些大质点的折射率跟周围均匀介质的折射率不同。如乳状液、含有悬浮物的流体、胶体溶液等就是这样的介质。由这些质点的无规则排列所引起的散射称为丁达尔散射。

② 由于介质中存在着密度起伏，破坏了介质的光学均匀性，从而导致光的散射。这种散射光的强度和波长的 4 次方成反比，即

$$I \propto \frac{1}{\lambda^4} \quad (2-13)$$

此关系称为瑞利定律。散射光的波长还是原来入射光的波长，只是入射光中波长较短的光散射系数大，即容易被散射。

大气散射是遵守瑞利定律的，这说明了为什么天空是蓝色的。而在日出或日落时，由于太阳光经过很厚的大气层，对透射光来说，波长短的蓝、绿光散射得较多，因此我们看到的太阳呈红色。

③ 在各向异性介质中，除了密度起伏外，分子的取向与它们最可能的平均取向也有偏差。这种偏差表现为这部分分子的极化率 ( $P = \chi E$  中的  $\chi$ ) 对其平均值有起伏，破坏了次波的相干性，这也会导致光的散射。

以上讨论的三种散射光，其波长与入射光相同，这样的散射称为瑞利散射。

此外还发现在散射光中，除有与入射光频率  $f_0$  相同的瑞利散射外，在瑞利线的两侧还有频率为  $f_0 \pm f_1$ ,  $f_0 \pm f_2 \dots$  的散射线存在。这种散射现象称之为喇曼散射。

光在介质中传播时，光强度因散射而衰减的函数关系与因吸收而衰减的关系相同，因而可把这两者合在一起写成

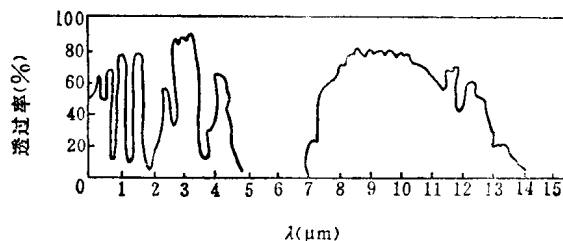


图2-8 大气的透过率



$$I = I_0 e^{-(\alpha + \beta)x} \quad (2-14)$$

式中,  $\beta$  为散射系数。

因此, 在测量吸收时, 要注意到有散射的部分。一般测量到的“吸收系数”实际包含两部分, 即吸收部分和散射部分。在很多情况下,  $\alpha$  和  $\beta$  两个值, 往往一个比另一个小得多, 因而可以忽略不计。

## 第四节 光的干涉、衍射和偏振

### 一、光的干涉

在图 2-9 a 所示的装置中, 由 He-Ne 激光器发出的光, 经一倒转的望远系统将光束截面积扩展, 得到一宽束平面光波。再利用有微小夹角的两反射镜  $M_1$  和  $M_2$  的反射, 将光波的波阵面 (波阵面又称波前, 是由波中等位相的点所构成的面) 分为两部分, 然后使两者在屏幕相遇, 在屏上就呈现出明暗相间的直条纹, 即屏幕上

不同位置处有不同的光强分布, 如图 2-9 b 所示。把由同一光源发出的光, 用适当的方法分成两部分, 并使它们经不同的光程后相遇, 相遇区各点的光强在某极大值和极小值之间变化 (其极大值可超过两部分光强之和, 其极小值可以是零), 这种现象称为光的干涉。能产生干涉的两部分光称为相干光, 明暗相间的条纹称为干涉条纹。两相邻条纹之间的间隔为

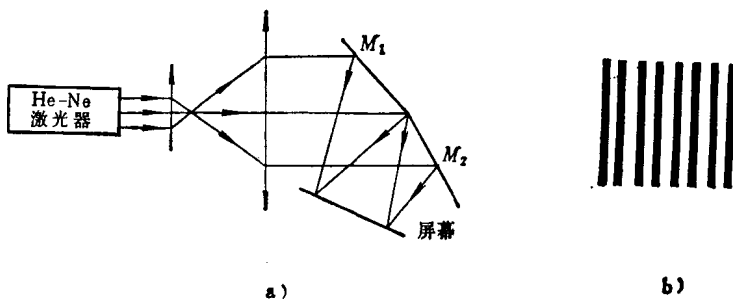


图 2-9 光的干涉  
a) 干涉装置 b) 干涉条纹

两相邻条纹之间的间隔为

$$\Delta x = \frac{\lambda}{2 \sin \theta} \quad (2-15)$$

式中,  $\lambda$  为光波的波长;  $\theta$  为光波与屏幕垂线的夹角。

光的干涉虽然不难实现, 但并非任意两光波相遇都能产生干涉现象。实验和理论分析可知, 由两个独立的光源发出的光是不会产生干涉现象的, 这是由于两光波在相遇点的相位差  $\delta$  不固定, 它随时间作不规则地迅速变化, 这样引起的光强变化是无法观察到的, 只能观察到某一时间间隔中的光强平均值, 它与两光波在该点单独产生的光强之和并无区别, 因而没有干涉现象。只有同一光源所发出的两个光波才有相同的频率, 并且在相遇点有固定的相位关系, 才能产生稳定的干涉条纹。因此, 两光波产生干涉即相干的第一个条件是: 两光波在相遇点有固定的相位差。

又由波叠加原理知道, 两光波在相遇点的振动方向也需一致, 否则两光波叠加后得不到上述的干涉现象, 这是两光束产生干涉的第二个条件。

这两个条件是产生干涉现象的必要条件, 但只满足这两个条件还不一定能产生明显的干涉现象。为确保产生明显的干涉, 还须满足以下两个补充条件:

- ① 两光波在相遇点所产生振动的振幅差不悬殊。若两光波在相遇点振幅相差很远, 如