




21世纪高职高专电子信息系列规划教材

# 光电检测技术

北京希望电子出版社 总策划  
李旭 主编  
王臻 副主编  
刘孟华 吴晓红 编著

 科学出版社  
www.sciencep.com

21世纪高职高专电子信息系列规划教材



# 光电检测技术

北京希望电子出版社 总策划  
李 旭 主 编  
王 臻 副主编  
刘孟华 吴晓红 编 著



科学出版社  
[www.sciencep.com](http://www.sciencep.com)

## 内 容 简 介

本书主要阐述了光电检测技术的基本原理和基本技术应用。内容包括光电检测技术基础、光电转换器件、发光器件、光电信号的变换及检测技术及光电信号的检测方法。

本书内容全面,语言通俗易懂,既强调系统性,又尽力突出基本概念、基本原理和基本方法,注重理论与实践相结合,实用性强,学生在学习本教材后,能熟悉光电检测的基本技术方法和应用领域并拓宽视野。本书可作为高职高专院校光电子、电子信息和光机仪器制造类专业教材,也可供其他对光电技术感兴趣的业余爱好者及工程技术工人参考。

需要本书或需要得到技术支持的读者,请与北京中关村 083 信箱(邮编 100080)发行部联系,电话:010-82702660,010-82702658,010-62978181 转 103 或 238,传真:010-82702698,E-mail: tbd@bhp.com.cn

### 图书在版编目(CIP)数据

光电检测技术/李旭主编. —北京:科学出版社,2005.6  
21世纪高职高专电子信息系列规划教材  
ISBN 7-03-014770-7  
I. 光... II. 李... III. 光电检测 IV. TN206  
中国版本图书馆CIP数据核字(2004)第134128号

责任编辑:曾 华 / 责任校对:张月岭  
责任印刷:媛 明 / 封面设计:梁运丽

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号  
邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京市媛明印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2005年6月第一版 开本:787×1092 1/16  
2005年6月第一次印刷 印张:16 1/2  
印数:1-3 000册 字数:379千字

定价:25.00元

## 序

进入21世纪，随着科技的进步，高新技术已成为当前的热门话题。光电子技术以其独特的功能，应用在各行各业之中，人们给予了高度的关注，该专业各层次人才的需求量越来越大。

作为高职院校，我们有义务也有责任担负起该专业人才培养的重任。2001年在华中科技大学专家的指导下，以武汉中国光谷为依托，武汉职业技术学院在全国高职院校率先开办了光电子技术专业。2004年6月，武汉职业技术学院电信学院与北京希望电子出版社通力合作，邀请了国内20多所高职院校的专家和学者，成功举办了高职光电子技术专业教学与教材研讨会，并取得圆满成功。与会专家一致认为，培养光电子技术专业人才有着广泛的就业市场，当务之急是建设适合本专业的基础课程和系列教材。

为此，武汉职业技术学院电信学院经过大量的市场调研，听取专家意见，最后在原有自编教材的基础上推出了系列光电子技术专业教材。本系列教材以最大限度地满足社会应用型人才综合能力的培养为价值取向。课程体系建设则以能力为主线，以能力训练为轴心，淡化普通文化课、技术基础课和专业课的界限，重新整合课程。课程设置的目的是强调基本职业能力训练，综合开发学生的职业能力；强化学生创新意识、创新精神和创新能力，提高学生对就业上岗和职业变化的适应力；增加课程的灵活性，形成模块化、弹性化的课程体系，在整体上适应行业和社会对人才规格多变的需求。本教材填补了国内高职光电子类专业教材的空白。

作为一种尝试和探索，难免存在这样或那样的问题，望广大从事光电子技术教育和应用的科技工作者，不吝赐教，提出宝贵的意见。

10.2.11.11

# 前 言

随着我国光电技术及产业的迅速发展,社会对光电子方面的职业技术应用型人才的需求不断加大。高职高专光电子专业发展得很快,但适应于高职高专层次的光电子类教材还较缺乏。为满足教学急需,根据教育部高职高专培养目标和对本课程的基本要求,编写了这本《光电检测技术》。

光电检测技术是涉及面较广的一门课程。我们在本教材的编写过程中,在内容的选取方面,尽量做到与目前高职高专学生的知识结构相适应,注重理论与实践相结合,实用性强,既强调系统性,又尽力突出基本概念、基本原理和基本方法,在满足“必须、够用”的条件下,尽量避免过多的理论上的数学推导。

全书共分5章,从光电检测中所需的基本概念和效应入手,进而介绍常用光电检测器件,再讲解到光电检测中的检测方法,最后给出在实际生产实践中的应用,使学生在学完本教材后,能熟悉光电检测的技术方法和应用领域并拓宽视野。章后的习题可供学生检验对所学知识的掌握情况。

本书第1章和第2章的第7节、第8节由吴晓红编写,第2章的第1至第5节及第3章、第4章由刘孟华编写,第2章的第6节及第5章由李旭编写。由李旭担任主编。在编写过程中,得到了武汉职业技术学院电信工程学院各级领导及各兄弟院校许多同志的大力支持,他们提出了许多宝贵意见,在此一并表示感谢。

本书可作为高职高专院校光电子、电子信息和光机仪器制造类专业教材,也可供其他对光电技术有兴趣的业余爱好者及工程技术工人参考。

光电子技术发展日新月异,由于编者学识有限,时间仓促,谬误之处在所难免,敬请读者批评指正。

编 者

# 目 录

第1章 光电检测技术基础.....	1	2.3.1 光电二极管.....	64
1.1 辐射度量与光度量的基础知识.....	1	2.3.2 光电三极管.....	72
1.1.1 光的本质.....	1	2.4 光电倍增管.....	79
1.1.2 辐射度的基本物理量.....	2	2.4.1 光电倍增管(PMT)的结构与 工作原理.....	79
1.1.3 光度的基本物理量.....	5	2.4.2 工作特性参数.....	83
1.1.4 热辐射的基本物理量.....	9	2.4.3 光电倍增管的应用.....	90
1.1.5 辐射度与光度中的基本定律.....	10	2.5 各种光电检测器件的性能比较和 应用选择.....	94
1.2 半导体的基础知识.....	15	2.5.1 接收光信号的方式.....	94
1.2.1 能带理论.....	15	2.5.2 各种光电检测器件的性能比较.....	95
1.2.2 热平衡载流子.....	19	2.5.3 光电检测器件的应用选择.....	95
1.2.3 非平衡载流子.....	21	2.6 变像管、像增强管、摄像管.....	98
1.2.4 载流子的运动.....	25	2.6.1 光电成像器件的基本特性.....	98
1.3 光电检测器件的基本物理效应.....	27	2.6.2 光电成像原理.....	100
1.3.1 光电子发射效应.....	28	2.6.3 像管的结构与工作原理.....	102
1.3.2 内光电效应(光电导效应与 光伏效应).....	31	2.6.4 像管的主要特性.....	103
1.3.3 光热效应.....	35	2.6.5 变像管与像增强管.....	104
1.3.4 热效应和光效应的差别.....	38	2.6.6 摄像管.....	106
1.4 光电检测器件的特性参量.....	39	2.7 电荷耦合器件(CCD).....	108
1.4.1 光电探测器的噪声.....	39	2.7.1 CCD的基本结构与工作原理.....	109
1.4.2 有关响应方面的特性参数.....	43	2.7.2 CCD摄像器件.....	114
1.4.3 其他参数.....	45	2.7.3 CCD的性能与应用.....	117
1.5 习题.....	46	2.8 热电检测器件.....	118
第2章 光电转换器件.....	48	2.8.1 基本原理.....	119
2.1 光电导器件.....	48	2.8.2 热电偶和热电堆.....	121
2.1.1 光敏电阻材料与电极结构.....	49	2.8.3 测辐射热计.....	123
2.1.2 光敏电阻的主要特征.....	50	2.8.4 热释电探测器.....	125
2.1.3 光电导探测器的噪声.....	55	2.9 习题.....	129
2.1.4 几种常用的光敏电阻.....	55	第3章 发光器件.....	133
2.2 光电池.....	57	3.1 发光二极管.....	133
2.2.1 硅光电池的基本结构和工作原理.....	58	3.1.1 发光二极管原理.....	134
2.2.2 硅光电池的特性参数.....	59	3.1.2 发光二极管的特性参数.....	134
2.2.3 光电池的应用.....	62	3.1.3 发光二极管的应用.....	137
2.3 光电二极管与光电三极管.....	64		

3.2 激光器.....	138	4.3 光信号的调制检测.....	187
3.2.1 激光器的工作原理.....	138	4.3.1 调制的基本概念.....	187
3.2.2 激光器的类型.....	139	4.3.2 典型的调制方法.....	188
3.2.3 激光的特性.....	142	4.3.3 调制器.....	190
3.3 场致发光屏、液晶显示器件、 电子束显示器件.....	143	4.4 简单光学目标的空间检测.....	198
3.3.1 场致发光屏.....	143	4.4.1 几何中心检测法.....	199
3.3.2 液晶显示器件.....	150	4.4.2 亮度中心检测法.....	203
3.3.3 电子束显示器件.....	155	4.5 光学图像的扫描.....	212
3.4 热辐射光源与气体放电光源.....	160	4.5.1 扫描的基本原理和分类.....	212
3.4.1 热辐射光源.....	160	4.5.2 图像扫描.....	216
3.4.2 气体放电光源.....	162	4.5.3 实体扫描.....	219
3.5 光电耦合器件.....	166	4.6 习题.....	222
3.5.1 光电耦合器件的结构 类型和组合方式.....	166	<b>第5章 光电信号的检测方法.....</b>	<b>224</b>
3.5.2 光电耦合器件的基本特性.....	168	5.1 几何量的光电检测法.....	224
3.5.3 光电耦合器件的特点.....	170	5.1.1 尺寸检测.....	224
3.5.4 光电耦合器件抗干扰强的原因.....	170	5.1.2 表面缺陷检测.....	229
3.5.5 光电耦合器件的应用.....	171	5.1.3 干涉图形的检测.....	230
3.6 习题.....	171	5.1.4 轴向测距.....	231
<b>第4章 光电信号的变换及检测技术.....</b>	<b>173</b>	5.2 物理变换的光电检测方法.....	233
4.1 光电变换的基本形式与类型.....	173	5.2.1 光电干涉测量技术.....	233
4.1.1 光电变换的基本形式.....	173	5.2.2 单频光相干的条纹检测.....	235
4.1.2 光电变换的类型.....	176	5.2.3 双频光相干的差频检测.....	238
4.2 光电检测的基本方法.....	176	5.3 光电检测在其他方面的应用.....	243
4.2.1 光通量的幅度测量.....	177	5.3.1 光电检测在遥感方面的应用.....	243
4.2.2 光通量的频率测量.....	182	5.3.2 光电检测在原子吸收光谱 分析中的应用.....	247
4.2.3 光通量的相位和时间测量.....	184	5.3.3 光电检测在机械量 检测中的应用.....	249

# 第 1 章 光电检测技术基础

## 1.1 辐射度量与光度量的基础知识

### 1.1.1 光的本质

#### 1. 光的两重性

几个世纪以来，关于光的本质问题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以后，人们才认识到光是一种电磁波。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、偏振以及光在各异性介质中的传播现象，但在光与物质的作用方面，如物质对光的吸收、色散和散射等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问题有了进一步的认识。认识到光具有波粒两重性，设想光由分离的能团——光量子（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。

#### 2. 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，只占有很窄的范围。电磁波也称电磁辐射，其重要特征是波长（或频率）。整个电磁波谱按波长排列。波长从  $0.01\mu\text{m}$  ~  $100\mu\text{m}$ ，或频率从  $3 \times 10^{12}$  ~  $3 \times 10^7 \text{Hz}$  范围属于光学波段，它包括紫外辐射、可见光和红外辐射 3 部分（如图 1-1 所示）。通常，波长短于  $0.38\mu\text{m}$  的是紫

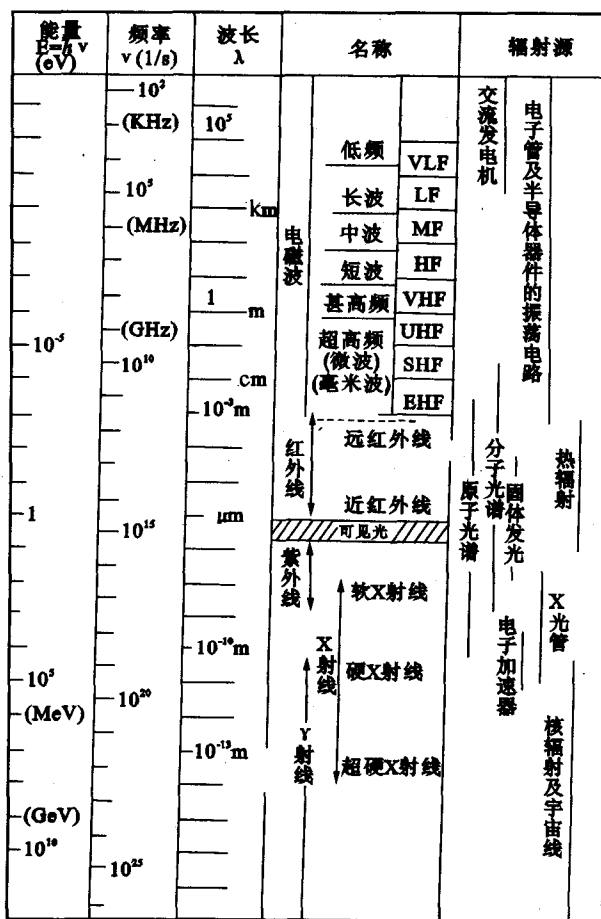


图 1-1 电磁波按波长的分类及各波长区域名称

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，如图 1-2 所示。人眼能感觉出光有不同的颜色，实质上是波长不同的光在人眼中所引起的感觉不同。

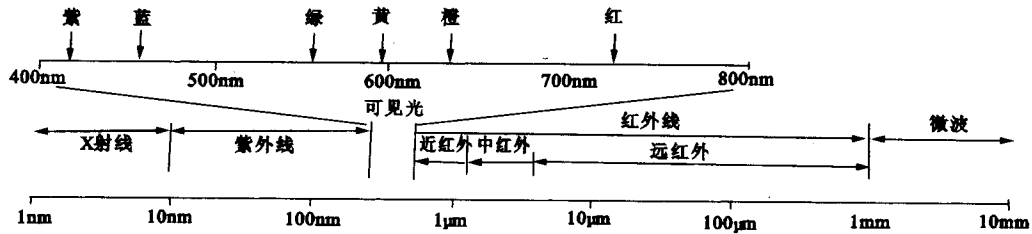


图 1-2 紫外、可见光和红外类波长

### 3. 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

$$E=h\nu \quad (1-1)$$

$h$  为普朗克常数 ( $h=6.25\times 10^{-34}\text{J}\cdot\text{s}$ )。

每个光子以速度  $c$  传播，可以把光看成一个波群，并想象它为一个频率为  $\nu$  的振荡，相邻振荡间的振荡距离等于波长  $\lambda$ ，于是波长  $\lambda=c/f$ 。此时式 1-1 可写成

$$E=hc/\lambda \quad (1-2)$$

由式 1-2 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。光在不同介质的传播速度之比  $n$  称为该介质的折射率，即

$$n=c/v \quad (1-3)$$

式中， $n$  为物质的特征参数。

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

$$\lambda_0=n\lambda \quad (1-4)$$

但是，除非特别说明，凡提到光的波长，通常均指光在真空中的波长。

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来解释。

#### 1.1.2 辐射度的基本物理量

##### 1. 辐射能 $Q_e$

辐射能是一种以辐射的形式发射、传播或接收的能量，单位是  $\text{J}$  (焦耳)。当辐射能被其他物质所吸收时，可以转变为其他形式的能量，如热能、电能等。

##### 2. 辐射通量 $\Phi_e$

辐射通量又称为辐射功率  $P_e$ ，是以辐射形式发射、传播或接收的功率，单位为  $\text{W}$  (瓦)，即  $1\text{w}=1\text{J/s}$  (焦耳/每秒)。它也是辐射能随时间的变化率。

$$\Phi = \frac{dQ_e}{dr} \quad (1-5)$$

### 3. 辐射强度 $I_e$

辐射强度定义为在给定方向上的单位立体角内，离开点辐射源（或辐射源面元）的辐射通量。从图 1-3 可见：

$$I_e = \frac{d\Phi_e}{d\Omega} \quad (1-6)$$

单位为 W/sr（瓦每球面度）。

若点辐射源是各向同性的，即其辐射强度在所有方向上都相同，则该辐射源在有限立体角内发射的辐射通量为

$$\Phi_e = I_e \Omega \quad (1-7)$$

在空间所有方向（ $\Omega=4\pi$ ）上的辐射通量为

$$\Phi_e = 4\pi I_e \quad (1-8)$$

实际上，一般辐射源多为各向异性的辐射源，其辐射强度随方向而变化，可用极坐标辐射强度表示，即  $I_e = I_e(\varphi, \theta)$  如图 1-4 所示，这样，点辐射源在整个空间发射的辐射通量为

$$\begin{aligned} \Phi_e &= \int I_e(\varphi, \theta) d\Omega \\ &= \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^\pi I_e(\varphi, \theta) \sin \theta d\theta \end{aligned} \quad (1-9)$$



图 1-3 点辐射源的辐射强度

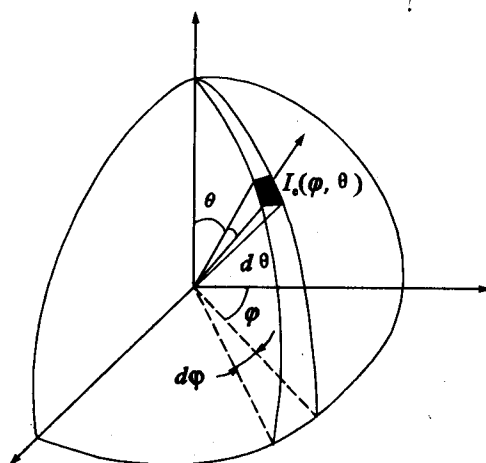


图 1-4 某一方向上的发光强度

### 4. 辐射出射度 $M_e$

辐射出射度为面辐射源表面单位面积（通常往半空间  $2\pi$  立体角）上发射的辐射通量，

$$\text{即} \quad M_e = \frac{d\Phi_e}{dS} \quad (1-10)$$

单位为  $\text{W}/\text{m}^2$  (瓦每平方米)。

### 5. 辐射照度 $E_e$

辐射照度为接收面上单位面积所照射的辐射通量, 即

$$E_e = \frac{d\Phi_e}{dA} \quad (1-11)$$

辐射通量的单位为  $\text{W}/\text{m}^2$  (瓦每平方米)。

辐射出射度  $M_e$  与辐射照度  $E_e$  表达式和单位完全相同, 其区别仅在于前者是描述面辐射源向外发射的辐射特性, 而后者则为描述辐射接收面所接收的辐射特性。对此, 应从概念上区别。

### 6. 辐射亮度 $L_e$

辐射亮度定义为辐射源表面一点处的面元在给定方向上的辐射强度, 除以该面元在垂直于该方向的平面上的正投影面积, 即

$$L_e = \frac{dI_e}{dS \cos \theta} = \frac{d^2\Phi_e}{d\Omega dS \cos \theta} \quad (1-12)$$

单位为  $\text{W}/\text{sr} \cdot \text{m}^2$  (瓦每球面度平方米)。(如图 1-5 所示)

一般辐射源表面各处的辐射亮度及该面源各方向上的辐射亮度都是不相同的, 此时辐射源的辐射亮度的一般表达式为

$$L_e(\varphi, \theta) = \frac{d^2\Phi_e(\varphi, \theta)}{d\Omega dS \cos \theta} \quad (1-13)$$

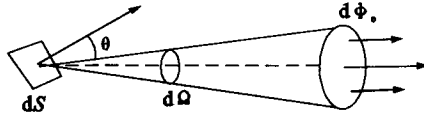


图 1-5 辐射源的辐射亮度

### 7. 光谱辐射量

实际上, 辐射源所发射的能量往往由很多波长的单色辐射所组成。为了研究各种波长的辐射能量, 还需对单一波长的光辐射作相关的规定。前面介绍的几个重要辐射量, 都有与其相对应的光谱辐射量。光谱辐射量又叫辐射量的光谱密度, 是辐射量随波长的变化率。

光谱辐射通量  $\Phi_e(\lambda)$ : 辐射源发出的光在波长  $\lambda$  处的单位波长间隔内的辐射通量。辐射通量与波长的关系曲线如图 1-6 所示, 其关系式为

$$\Phi_e(\lambda) = \frac{d\Phi_e}{d\lambda} \quad (1-14)$$

单位为  $\text{W}/\mu\text{m}$  (瓦每微米), 或  $\text{W}/\text{nm}$  (瓦每纳米)。

其他辐射量也有类似的关系:

光谱辐照度

$$E_e(\lambda) = \frac{dE_e}{d\lambda} \quad (1-15)$$

光谱辐射出射度

$$M_e(\lambda) = \frac{dM_e}{d\lambda} \quad (1-16)$$

光谱辐射亮度

$$L_e(\lambda) = \frac{dL_e}{d\lambda} \quad (1-17)$$

辐射源的总辐射通量是

$$\Phi_e = \int_0^{\infty} \Phi_e(\lambda) d\lambda \quad (1-18)$$

对其他辐射量也有类似的关系，用一般的函数表示：

$$X_e = \int_0^{\infty} X_e(\lambda) d\lambda \quad (1-19)$$

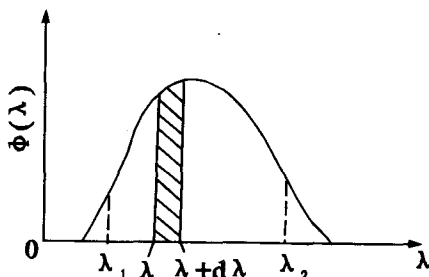


图 1-6 光谱辐射通量与波长的关系

### 1.1.3 光度的基本物理量

#### 1. 光谱光视效应

人眼的视网膜上分布着大量的感光细胞：杆状细胞和锥体细胞。杆状细胞的灵敏度高，能感受极微弱的光，但不能辨别颜色和分清视场中的细节；锥体细胞灵敏度较低，只能感受较亮的物体，但能很好地区分颜色，辨别细节。

视神经对各种不同波长光的感光灵敏度是不一样的。对绿光最灵敏，对红、蓝光灵敏度较低。另外，由于受视觉和心理的作用，不同的人对各种波长光的感光灵敏度也有差别。国际照明委员会（CIE）根据对许多人的大量观察结果，确定了人眼对各种波长的平均相对灵敏度，称为“标准光度观察者”光谱光视效率，或称视见函数。如图 1-7 所示，图中实线是亮度大于  $3\text{cd}/\text{m}^2$  时的明视觉光谱光视效率，用  $V(\lambda)$  表示，此时的视觉主要由锥体细胞的刺激所引起的； $V(\lambda)$  的最大值在  $555\text{nm}$  处。图中虚线是亮度小于  $0.001\text{cd}/\text{m}^2$  时的暗视觉光谱光视效率，用  $V'(\lambda)$  表示，此时的视觉主要由杆状细胞的刺激所引起的； $V'(\lambda)$  的最大值在  $507\text{nm}$  处。表 1-1 给出了人眼的光谱光视效率的数值。

表 1-1 明视觉和暗视觉的光谱光视效率 (最大值=1)

波长 (nm)	明视觉 $V(\lambda)$	暗视觉 $V'(\lambda)$	波长 (nm)	明视觉 $V(\lambda)$	暗视觉 $V'(\lambda)$
380	0.00004	0.000589	590	0.757	0.0655
390	0.00012	0.002209	600	0.631	0.03315
400	0.0004	0.00929	610	0.503	0.01593
410	0.0012	0.03484	620	0.381	0.00737
420	0.0040	0.0966	630	0.265	0.003335
430	0.0116	0.1998	640	0.175	0.001497
440	0.023	0.03281	650	0.107	0.000677
450	0.038	0.455	660	0.061	0.0003129
460	0.060	0.567	670	0.032	0.0001480
470	0.091	0.676	680	0.017	0.000715
480	0.139	0.793	690	0.0082	0.0003533
490	0.208	0.904	700	0.0041	0.00001780
500	0.323	0.982	710	0.0021	0.0000914
510	0.503	0.997	720	0.00105	0.0000478
520	0.710	0.935	730	0.00052	0.00002546
530	0.862	0.811	740	0.00025	0.000001379
540	0.954	0.650	750	0.00012	0.000000760
550	0.995	0.481	760	0.00006	0.000000425
560	0.995	0.3288	770	0.00003	0.0000002413
570	0.952	0.2076	780	0.000015	0.0000001390
580	0.870	0.1212			

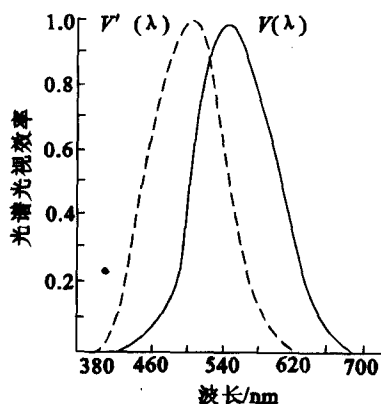


图 1-7 光谱光视效率曲线

## 2. 光度的基本物理量

光度量和辐射度量的定义, 定义方程是一一对应的。为避免混淆, 在辐射度量符号上加下标  $e$ , 而在光度量符号上加下标  $v$ 。表 1-2 给出了辐射度量与光度量之间的对应关系。

表 1-2 辐射度量和光度量之间的对应表

辐射度系统参量				光度系统参量			
名称	符号	定义	单位	名称	符号	定义	单位
辐射能	$Q_e$		焦耳 (J)	光能	$Q_v$	$Q_v = \Phi_v t$	流明·秒 (lm·s)
辐射通量 (辐射功率)	$\Phi_e$	$\Phi_e = \frac{dQ_e}{dt}$	瓦特 (W)	光通量 (光功率)	$\Phi_v$	$\Phi_v = \frac{dQ_v}{dt}$	流明 (lm)
辐射强度	$I_e$	$I_e = \frac{d\Phi_e}{d\Omega}$	$\frac{\text{瓦特 (W)}}{\text{球面度 (sr)}}$	发光强度	$I_v$	$I_v = \frac{d\Phi_v}{d\Omega}$	坎德拉 (cd)
辐射 出射度	$M_e$	$M_e = \frac{d\Phi_e}{dS}$	$\frac{\text{瓦特 (W)}}{\text{米}^2 (\text{m}^2)}$	光出射度	$M_v$	$M_v = \frac{d\Phi_v}{dS}$	$\frac{\text{流明 (lm)}}{\text{米}^2 (\text{m}^2)}$
辐射亮度	$L_e$	$L_e = \frac{d^2\Phi_e}{d\Omega dS \cos\theta}$	$\frac{\text{瓦特 (W)}}{\text{球面度} \cdot \text{米}^2 (\text{sr} \cdot \text{m}^2)}$	光亮度	$L_v$	$L_v = \frac{d^2\Phi_v}{d\Omega dS \cos\theta}$	$\frac{\text{坎德拉 (cd)}}{\text{米}^2 (\text{m}^2)}$
辐射照度	$E_e$	$E_e = \frac{d\Phi_e}{dA}$	$\frac{\text{瓦特 (W)}}{\text{米}^2 (\text{m}^2)}$	光照度	$E_v$	$E_v = \frac{d\Phi_v}{dA}$	勒克斯 (lx)

人眼对等能量的不同波长的可见光辐射能所产生的光感觉是不同的。光谱辐射通量为  $Q_e(\lambda)$  的可见光辐射，所产生的视觉刺激值，即光通量

$$\Phi_v = K_m \cdot V(\lambda) \cdot \Phi_e(\lambda) \quad (1-20)$$

$K_m$  称为明视觉最大光谱光视效能，它表示人眼对波长为  $555\text{nm}$  [ $v(555) = 1$ ] 光辐射产生光感觉的效能。 $K_m$  等于  $683\text{lm/w}$ 。对含有不同光谱辐射通量的一个辐射量，它所产生的光通量为

$$\Phi_v = K_m \int_{380}^{780} V(\lambda) \cdot \Phi_e(\lambda) d\lambda \quad (1-21)$$

同理，其他光度量也有类似的关系。用一般的函数表示光度量与辐射量之间的关系，则有

$$X_v = K_m \int_{380}^{780} V(\lambda) X_e(\lambda) d\lambda \quad (1-22)$$

光度量中最基本的单位是发光强度的单位——坎德拉 (candela)，记作 cd，它是国际单位制中 7 个基本单位之一。其定义是发出频率为  $540 \times 10^{12}\text{Hz}$  (对应空气中  $555\text{nm}$  波长) 的单色辐射，在给定方向上的辐射强度为  $1/683\text{Wsr}^{-1}$  时，在该方向上的发光强度为  $1\text{cd}$ 。

光通量的单位是流明 (lm)，它是发光强度为  $1\text{cd}$  的均匀点光源在单位立体角 (1sr) 内发出的光通量。

光照度的单位是勒克斯 (lx)，它相当于  $1\text{lm}$  的光通量均匀地照射在  $1\text{m}^2$  面积上所产生的光照度。过去曾用的单位有：辐脱、英尺烛，它们之间的换算关系如表 1-3~表 1-6 所示。

表 1-3 照度单位换算表

单位 (符号)	勒克斯 (lx)	毫勒克斯 (mlx)	辐脱 (ph)	英尺烛 (fc)
1 勒克斯 (lx)	1	$10^3$	$10^{-4}$	$9.29 \times 10^{-2}$
1 毫勒克斯 (mlx)	$10^{-3}$	1	$10^{-7}$	$9.29 \times 10^{-5}$
1 辐脱 (ph)	$10^4$	$10^7$	1	929
1 英尺烛 (fc)	10.764	$10.764 \times 10^3$	$1.0764 \times 10^{-3}$	1

表 1-4 亮度单位换算表

亮度单位	坎德拉/平方米 (cd/m <sup>2</sup> )	熙提 (sb)	阿熙提 (asb)	朗伯 (L)	毫朗伯 (mL)	英尺朗伯 (ft·L)	坎德拉/平方英尺 (cd/ft <sup>2</sup> )
1 尼特 (cd/m <sup>2</sup> )	1	$1 \times 10^{-4}$	3.1416	$3.1416 \times 10^{-4}$	0.314 16	0.2919	0.0929
1 熙提 (cd/cm <sup>2</sup> )	$1 \times 10^4$	1	$3.1416 \times 10^4$	3.1416	3141.6	2919	929
1 阿熙提 ( $\frac{1}{\pi}$ cd/m <sup>2</sup> )	0.3183	$3.183 \times 10^{-3}$	1	$1 \times 10^{-4}$	0.1	0.0929	0.029 57
1 朗伯 ( $\frac{1}{\pi}$ cd/cm <sup>2</sup> )	3.183	0.3183	$1 \times 10^4$	1	1000	929	295.7
1 毫朗伯 (mL)	3.183	$3.183 \times 10^{-4}$	10	0.001	1	0.929	0.2957
1 英尺朗伯 ( $\frac{1}{\pi}$ cd/ft <sup>2</sup> )	3.426	$3.426 \times 10^{-4}$	10.764	$\frac{0.001}{0.764}$	1.0764	1	0.3183
1 坎德拉/平方英尺 (cd/ft <sup>2</sup> )	10.764	0.001 0764	33.82	0.003 382	3.382	3.1416	1

表 1-5 环境常见照度值

环境	照度 (lx)	环境	照度 (lx)
阳光直射	$1 \sim 1.3 \times 10^5$	晨昏蒙影	10
晴天室外 (无阳光直射)	$1 \sim 2 \times 10^4$	暗晨昏蒙影	1
阴天室外	500~1500	整圆明月	0.2
漆黑天	$10^2$	上、下弦月	$10^{-2}$
工作台	50~250	无月晴空	$10^{-3}$
可阅读条件	20	无月阴空	$10^{-4}$

表 1-6 常见发光体亮度值

发光体及条件	亮度 ( $\times 10^4$ cd/m <sup>2</sup> )
太阳	$1.9 \times 10^3$ $1.6 \times 10^3$

(续表)

发光体及条件		亮度 ( $\times 10^4 \text{cd/m}^2$ )
天空	夏日平均	0.5
	离太阳远的纯蓝天	<0.1
	稍有云	1
月亮		0.25
2856k 时的钨灯		$10^3$

### 1.1.4 热辐射的基本物理量

由于外界热量传递给物体而发生的辐射称为热辐射。热辐射源的特性是它的辐射能量直接与它的温度有关。如果物体从周围物体吸收辐射能所得到的热量恰好等于自身辐射而减少的能量,则辐射过程达到平衡状态,这称为热平衡辐射,这时辐射体可以用一个固定的温度  $T$  来描述。在研究热平衡辐射所遵从的规律时,我们假定物体发射能量和吸收能量的过程中,除了物体的热状态有所改变外,它的成分并不发生其他变化。因此,辐射能量的发出和吸收有特殊意义。

#### 1. 辐射本领 $M'_\lambda(\lambda, T)$

辐射本领是辐射体表面在单位波长间隔单位面积内所辐射的通量,即

$$M'_\lambda(\lambda, T) = \frac{d\Phi_e}{d\lambda dA} \quad (1-23)$$

式中  $d\Phi_e$  为元表面  $dA$  在波长  $\lambda$  到  $\lambda + d\lambda$  间隔内的辐射通量。 $M'_\lambda(\lambda, T)$  是辐射波长  $\lambda$  和辐射的温度  $T$  的函数。单位为  $\text{W}/\mu\text{m} \cdot \text{m}^2$  (瓦每微米平方米)。

#### 2. 吸收率 $\alpha(\lambda, T)$

吸收率  $\alpha(\lambda, T)$  是在波长  $\lambda$  到  $\lambda + d\lambda$  间隔内被物体吸收的通量与入射通量之比,它与物体的温度  $T$  及波长  $\lambda$  有关,定义式为

$$\alpha(\lambda, T) = \frac{d\Phi'_e(\lambda)}{d\Phi_e(\lambda)} \quad (1-24)$$

式中  $d\Phi_e(\lambda)$  是在波长  $\lambda$  到  $\lambda + d\lambda$  间隔内入射到物体上的通量,而  $d\Phi'_e(\lambda)$  则是在相应的波长间隔内物体吸收的通量。由上式可知,  $\alpha(\lambda, T)$  是一个无量纲的量。

#### 3. 绝对黑体

任何物体,只要其温度在绝对零度以上,就向外界发出辐射,这称为温度辐射。黑体是一种完全的温度辐射体,定义吸收率  $\alpha(\lambda, T) = 1$  的物体为绝对黑体,其辐射本领用  $M'_{\lambda_b}(\lambda, T)$  表示,则

$$M'_{\lambda_b}(\lambda, T) = \frac{M'_\lambda(\lambda, T)}{\alpha(\lambda, T)} \quad (1-25)$$

因为一般物体的  $\alpha(\lambda, T) < 1$ , 所以  $M'_{\lambda_b}(\lambda, T) > M'_\lambda(\lambda, T)$ 。这表明:在同一温度  $T$  中对任何波长,物体的辐射本领不会大于黑体的辐射本领。

4. 物体的发射率  $\varepsilon(\lambda, T)$ 

物体的发射率  $\varepsilon(\lambda, T)$  定义为物体的辐射本领  $M'_\lambda(\lambda, T)$  与绝对黑体辐射本领  $M'_{\lambda b}(\lambda, T)$  之比, 即

$$\varepsilon(\lambda, T) = \frac{M'_\lambda(\lambda, T)}{M'_{\lambda b}(\lambda, T)} \quad (1-26)$$

由式 1-26 可以看出,  $\varepsilon(\lambda, T) = \alpha(\lambda, T)$ , 这说明任何具有强辐射吸收的物体必定发出强的辐射。

非黑体 ( $0 < \varepsilon < 1$ ) 的辐射能力不仅与温度有关, 而且与表面材料的性质有关。在自然界中, 理想的黑体是不存在的, 吸收本领最多只有 0.96~0.99。工作时, 黑体往往是用表面涂黑的球形或柱形空腔来人为地实现。

## 1.1.5 辐射度与光度中的基本定律

## 1. 余弦定律

由图 1-8 可见, 与光束传输方向成  $\theta$  角的表面积  $S'$  和它在垂直传播方向上的投影面积  $S$  对  $O$  点所张的立体角  $\Omega$  是相同的。在该立体角内点光源发出的辐射通量不随传输距离而变化。这样, 投影面积  $S$  和  $S'$  的表面上的辐照度  $E$  和  $E'$  分别为

$$E = \frac{\Phi}{S}, \quad E' = \frac{\Phi}{S'} \quad (1-27)$$

因为  $S = S' \cos \theta$ , 所以  $E = S' \cos \theta$

这就是辐射度的余弦定律 (如图 1-8 所示)。它表明: 任一表面上的辐照度都随该表面法线和辐射能传输方向之间夹角的余弦而变化。

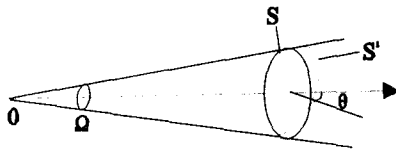


图 1-8 点光源光能的传输

余弦定律的另一种情况是对完全漫射体而言的, 也叫朗伯余弦定律。朗伯把理想漫射表面定义为: 在任意发射 (漫射、透射) 方向上辐亮度不变的表面, 即对任何  $\theta$  角  $L_e$  为恒定值。通常把具有这种特性的表面称做朗伯表面。如图 1-9 所示, 由辐亮度的定义: 法线方向上辐射强度为  $I_0$ , 表面积为  $dA$  的辐射表面, 其辐亮度为  $I_0/dA$ , 而沿与表面法线成  $\theta$  角方向的辐亮度为  $I_\theta/dA \cos \theta$ 。对于朗伯表面有  $I_0/dA = I_\theta/(dA \cos \theta)$ , 所以

$$I_\theta = I_0 \cos \theta \quad (1-28)$$

这就是说, 朗伯辐射表面在某方向上的辐射强度随与该方向和表面法线之间夹角的余弦而变化。如果以代表法线方向上的辐射强度值的线段为直径作一与表面  $dA$  相切的球, 那么由表面  $dA$  的中心向某  $\theta$  角方向所作的到球面交点的矢量长度, 就表示该方向的辐射强度的大小。