



湖北高职“十一五”规划教材

HUBEI GAOZHI "SHIYIWU" GUIHUA JIAOCAI

湖北省高等教育学会高职专委会研制

总策划 李友玉
策划 屠莲芳

光电探测技术

GUANGDIAN TANCE JISHU

王臻 刘孟华 主编



湖北长江出版集团

湖北科学技术出版社



湖北高职“十一五”规划教材

HUBEI GAOZHI "SHIYIWU" GUIHUA JIAOCAI

湖北省高等教育学会高职专委会研制

总策划 李友玉

策划 屠莲芳

光电探测技术

主 编 王 臻 刘孟华

副主编 李建新 杨 凡

编 者 (以姓氏笔画为序)

王 臻 刘孟华 李建新

宋露露 杨 凡 张 森

张雅娟

主 审 杨坤涛

湖北长江出版集团
湖北科学技术出版社

图书在版编目(CIP)数据

光电探测技术/王臻,刘孟华主编. —武汉:湖北科学技术出版社,2008.8
湖北高职高专“十一五”规划教材
ISBN 978-7-5352-4140-5

I. 光… II. ①王…②刘… III. 光电探测-技术学校:技术学校-教材 IV.
TN215

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 102698 号

光电探测技术

©王 臻 刘孟华主编

责任编辑:李海宁

责任校对:蒋 静

封面设计:喻 杨

出版发行:湖北科学技术出版社

电话:87679468

地 址:武汉市雄楚大街 268 号
湖北出版文化城 B 座 12-13 层

邮编:430070

网 址:<http://www.hbstp.com.cn>

印 刷:湖北恒泰印务有限公司

邮编:430223

787 毫米 × 1092 毫米

16 开 印张 13.5

2008 年 8 月第 1 版

2008 年 8 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-5352-4140-5

定价:24.00 元

本书如有印装质量问题 可找承印厂更换

教材是教师教学的脚本,是学生学习的课本,是学校实现人才培养目标的载体。优秀教师研制优质教材,优质教材造就优秀教师,培育优秀学生。教材建设是学校教学最基本的建设,是提高教育教学质量最基础性的工作。

高职教育是中国特色的创举。我国创办高职教育时间不长,高职教材存在严重的“先天不足”,如中专延伸版、专科移植版、本科压缩版等。这在很大程度上制约着高职教育教学质量的提高。因此,根据高职教育培养“高素质技能型专门人才”的目标和教育教学实际需求,研制优质教材,势在必行。

2005年以来,湖北省高等教育学会高职高专教育管理专业委员会(简称“高职专委会”),高瞻远瞩,审时度势,深刻领会国家关于“大力发展职业教育”和“提高高等教育质量”之精神,准确把握高职教育发展之趋势,积极呼应全省高职院校发展之共同追求;大倡研究之风,大鼓合作之气,组织全省高职院校开展“队伍建设、专业建设、课程建设、教材建设”(简称“四个建设”)的合作研究与交流,旨在推进全省高职院校进一步全面贯彻党的教育方针,创新教育思想,以服务为宗旨,以就业为导向,工学结合、校企合作,走产学研结合发展道路;推进高职院校培育特色专业、打造精品课程、研制优质教材、培养高素质的教师队伍,提升学校整体办学实力与核心竞争力;促进全省高职院校走内涵发展道路,全面提高教育教学质量。

湖北省教育厅将高职专委会“四个建设”系列课题列为“湖北省教育科学‘十一五’规划专项资助重点课题”。全省高职院校纷纷响应,几千名骨干教师和一批生产、建设、服务、管理一线的专家,一起参加课题协同攻关。在科学研究过程中,坚持平等合作,相互交流;坚持研训结合,相互促进;坚持课题合作研究与教材合作研制有机结合,用新思想、新理念指导教材研制,塑造教材“新、特、活、实、精”的优良品质;坚持以学生为本,精心酿造学生成长的精神食粮。全省高职院校重学习研究,重合作创新蔚然成风。

这种以学会为平台,以学术研究为基础开展的“四个建设”,符合教育部关于提高教育教学质量的精神,符合高职院校发展的需求,符合高职教师发展的需求。

在湖北省教育厅和湖北省高等教育学会领导的大力支持下,在湖北省高等教育学会秘书处的指导下,经过两年多艰苦不懈的努力和深入细致的工作,“四个建设”合作研究初见成效。高职专委会与湖北长江出版集团、武汉大学出版社、复旦大学出版社等知名出版单位携手,正陆续推出课题研究成果:“湖北高职‘十一五’规划教材”,这是全省高职集体智慧的结晶。

交流出水平,研究出智慧,合作出成果,锤炼出精品。凝聚集体智慧,共创湖北高职教育品牌——这是全省高职教育工作者的共同心声!

湖北省高教学会高职专委会主任 黄木生
2008年6月

本教材是湖北高职“十一五”规划教材,是在湖北省教育厅立项的湖北省教育科学“十一五”规划专项资助重点课题《高职光电电子技术课程体系研究》(湖北高职“四个建设”系列规划课题)的成果基础上合作研制而成的。

光电探测技术是涉及光电信息、光电器件应用和传感技术等方面的专业核心课程。该课程知识面广、系统性强,在重理论、强实践的同时,更注重理论与实践的紧密结合。

本教材注重培养学生分析问题和解决问题的能力,特别是专业技能、综合实践能力和综合技能的培养。体现了六个方面的特点:理论与应用以应用为主、深度与广度以广度优先、难度与易度以易度优先、传统与创新以创新优先、利教与利学以利学为主、知识与技能以技能为主。

湖北省高等教育学会副秘书长、湖北省教育科学研究所高教研究中心主任李友玉研究员,湖北省高等教育学会高职高专教育管理专业委员会教学组组长李家瑞教授、秘书长屠莲芳,负责本教材研制队伍的组建、管理和本教材研制标准、研制计划的制定与实施。

本教材共分十章。第一章由武汉职业技术学院王臻编写,第二、三、四章由武汉职业技术学院刘孟华编写,第五章由武汉软件工程职业学院李建新编写,第六章由武汉交通职业学院杨凡编写,第七、八章由武汉职业技术学院张雅娟、宋露露编写,第九章由武汉职业技术学院张森编写,第十章由武汉职业技术学院刘孟华编写。全书由王臻、刘孟华统稿,华中科技大学杨坤涛教授审阅了全书并给予意见和肯定,在此深表感谢。

本教材研制过程中,参阅了大量文献和成果,得到了合作院校和相关单位的大力支持,在此一一表示感谢。

由于作者学识有限,时间仓促,谬误之处在所难免,敬请专家学者批评指正。

湖北高职“十一五”规划教材
《光电探测技术》研制组
2008年6月



目 录

第 1 章 光电探测技术基础	(1)
1.1 辐射度量与光度量的基础知识	(1)
1.1.1 光的本质	(1)
1.1.2 辐射度的基本物理量	(2)
1.1.3 光度的基本物理量	(4)
1.1.4 热辐射的基本物理量	(7)
1.1.5 辐射度与光度中的基本定律	(8)
1.2 半导体的基础知识	(12)
1.2.1 能带理论	(12)
1.2.2 热平衡载流子	(15)
1.2.3 非平衡载流子	(16)
1.2.4 载流子的运动	(20)
1.3 光电检测器件的基本物理效应	(22)
1.3.1 光电子发射效应	(22)
1.3.2 内光电效应(光电导效应与光伏效应)	(25)
1.3.3 光热效应	(28)
1.3.4 热效应和光效应的差别	(31)
1.4 光电检测器件的特性参量	(31)
1.4.1 光电探测器的噪声	(31)
1.4.2 有关响应方面的特性参数	(34)
1.4.3 其他参数	(36)
思考题与习题	(37)
第 2 章 常用探测器光源	(39)
2.1 发光二极管	(39)
2.1.1 发光二极管原理	(39)
2.1.2 发光二极管的特性参数	(40)
2.1.3 发光二极管的应用	(42)
2.2 激光器	(44)
2.2.1 激光器的工作原理	(44)
2.2.2 激光器的类型	(44)
2.2.3 激光的特性	(46)
2.3 热辐射光源与气体放电光源	(48)
2.3.1 热辐射光源	(48)
2.3.2 气体放电光源	(50)
思考题与习题	(53)

第3章 半导体光电探测器件	(54)
3.1 光电导器件	(54)
3.1.1 光敏电阻材料与电极结构	(54)
3.1.2 光敏电阻的主要特征	(55)
3.1.3 光电导探测器的噪声	(59)
3.1.4 几种常用的光敏电阻	(59)
3.2 光电池	(62)
3.2.1 硅光电池的基本结构和工作原理	(62)
3.2.2 硅光电池的特性参数	(63)
3.2.3 光电池的应用	(66)
3.3 光电二极管与光电三极管	(66)
3.3.1 光电二极管	(66)
3.3.2 光电三极管	(74)
思考题与习题	(79)
第4章 真空探测器件	(80)
4.1 光电倍增管	(80)
4.1.1 光电倍增管(PMT)的结构与工作原理	(80)
4.1.2 工作特性参数	(83)
4.2 光电倍增管的应用	(86)
4.2.1 光谱测量	(86)
4.2.2 细胞分类	(91)
4.3 各种光电检测器件的性能比较和应用选择	(91)
4.3.1 接收光信号的方式	(91)
4.3.2 各种光电检测器件的性能比较	(92)
4.3.3 光电检测器件的应用选择	(92)
思考题与习题	(94)
第5章 光电成像探测器件	(96)
5.1 光电成像器件的基本特性	(96)
5.1.1 光谱响应	(96)
5.1.2 转换特性	(97)
5.1.3 分辨率	(98)
5.2 光电成像原理	(98)
5.3 变像管、像增强管、摄像管	(99)
5.3.1 像管的结构与工作原理	(99)
5.3.2 像管的主要特性	(101)
5.3.3 变像管与像增强管	(101)
5.3.4 摄像管	(103)
5.4 电荷耦合器件(CCD)	(106)
5.4.1 CCD的基本结构与工作原理	(106)
5.4.2 信号的输入与输出	(108)



5.4.3	CCD 的物理特性	(110)
5.4.4	CCD 摄像器件	(111)
5.4.5	CCD 的性能与应用	(113)
	思考题与习题	(115)
第6章	光电耦合器件与象限探测器	(116)
6.1	光电耦合器件	(116)
6.1.1	光电耦合器件的结构类型和组合方式	(116)
6.1.2	光电耦合器件的基本特性	(117)
6.1.3	光电耦合器件的特点及应用	(119)
6.2	象限探测器	(121)
6.2.1	PSD	(121)
6.2.2	四象限探测器	(122)
	思考题与习题	(127)
第7章	热电探测器件	(128)
7.1	热电探测器件的基本原理	(128)
7.1.1	热回路方程	(128)
7.1.2	热电探测器的共性	(129)
7.2	热电偶和热电堆	(129)
7.3	测辐射热计	(131)
7.4	热释电探测器	(133)
7.4.1	热释电探测器的工作原理	(133)
7.4.2	噪声等效功率	(135)
7.4.3	热释电探测器的阻抗特性	(135)
7.4.4	几种常用的热释电探测器	(136)
	思考题与习题	(137)
第8章	光电探测信号的变换及技术	(138)
8.1	光电探测变换的基本形式与类型	(138)
8.1.1	光电探测变换的基本形式	(138)
8.1.2	光电变换的类型	(140)
8.2	光电探测的基本方法	(141)
8.2.1	光通量的幅度测量	(142)
8.2.2	光通量的频率测量	(145)
8.2.3	光通量的相位和时间测量	(147)
8.3	简单光学目标的空间探测	(150)
8.3.1	几何中心检测法	(151)
8.3.2	亮度中心检测法	(154)
8.4	物理变换的光电探测方法	(155)
8.4.1	光电干涉测量技术	(155)
8.4.2	单频光相干的条纹检测	(157)
8.4.3	双频光相干的差频检测	(160)

8.5 光学图像的扫描	(165)
8.5.1 扫描的基本原理和分类	(165)
8.5.2 图像扫描	(168)
8.5.3 实体扫描	(171)
思考题与习题	(174)
第9章 光电信号的探检测方式	(176)
9.1 尺寸探测检测	(176)
9.1.1 微小尺寸的检测	(176)
9.1.2 小尺寸的检测	(177)
9.1.3 大尺寸的检测	(179)
9.1.4 物体轮廓尺寸的检测	(179)
9.2 表面缺陷检测	(180)
9.2.1 透射法	(180)
9.2.2 反射法	(181)
9.3 干涉图形的检测	(181)
9.4 轴向测距	(182)
9.4.1 像点轴上偏移检测的光焦点法	(182)
9.4.2 像点轴外偏移检测的像偏移法	(183)
第10章 光电探测技术的应用	(185)
10.1 光电检测在遥感方面的应用	(185)
10.1.1 遥感仪简介	(186)
10.1.2 遥感测量原理	(186)
10.1.3 机载红外相机工作原理	(187)
10.1.4 机载多波段扫描仪	(187)
10.2 光电检测在原子吸收光谱分析中的应用	(188)
10.2.1 基本原理	(188)
10.2.2 原子吸收分光光度计的组成	(189)
10.3 光电检测在机械量检测中的应用	(191)
10.3.1 光电检测机械量的基本原理	(191)
10.3.2 硬度的光电探测	(193)
10.3.3 流量的光电探测	(194)
10.3.4 光电扫描温度计(热像仪)	(196)
参考文献	(198)



第1章 光电探测技术基础

1.1 辐射度量与光度量的基础知识

1.1.1 光的本质

人们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、偏振以及光在各向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。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。

1. 光的两重性

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

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

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

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 ν 的振荡,相邻振荡间的振荡距离等于波长 λ ,于是波长 $\lambda = c/\nu$ 。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 ——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 λ_0 到 λ 分别表示频率为 ν 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 1mW 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。

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 $0.01 \sim 1000\mu\text{m}$,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(如图 1-1 所示)。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,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。

能量 $E=h\nu$ (eV)	频率 ν (1/s)	波长 λ	名称		辐射源
			电磁波	其他	
10^2 (kHz)	10^5	km	低频	VLF	交流发电机 电子管及半导体器件的振荡电路
			长波	LF	
			中波	MF	
			短波	HF	
			甚高频	VHF	
			超高频 (微波) (毫米波)	UHF SHF EHF	
10^5 (GHz)	10^{10}	m	远红外线		热辐射 分子光谱 原子光谱
			近红外线		
1	10^{15}	μm	可见光		X光管 电子加速器 核辐射及宇宙线
			紫外线		
10^5 (MeV)	10^{20}	10^{-10}m	软X射线		X光管 电子加速器 核辐射及宇宙线
			X射线		
			硬X射线		
10^9 (GeV)	10^{25}	10^{-13}m	Y射线		核辐射及宇宙线
			超硬X射线		

图 1-1 电磁波按波长的分类及各波长区域名称

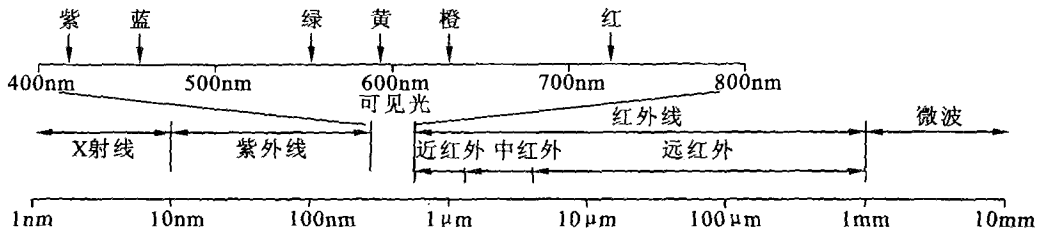


图 1-2 紫外、可见光和红外类波长

1.1.2 辐射度的基本物理量

1. 辐射能 Q 。

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 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 Φ_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 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。

$$\Phi_e = \frac{dQ_e}{dt} \quad (1-5)$$

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(或辐射源面源)的辐射通量。从图 1-3 可见:

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

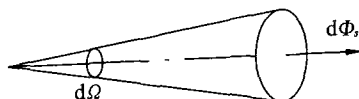


图 1-3 点辐射源的辐射强度

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

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

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 2π 立体角)上发射的辐射通量, 即:

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

单位为 W/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 W/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

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

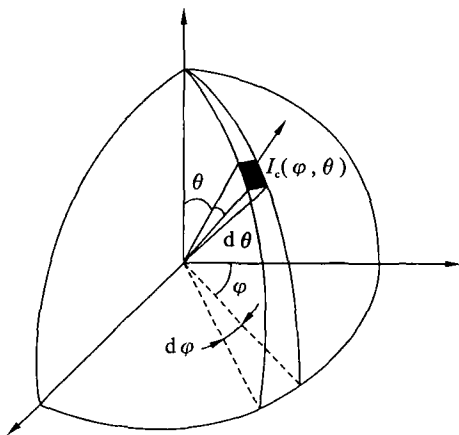


图 1-4 某一方向上的发光强度

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

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

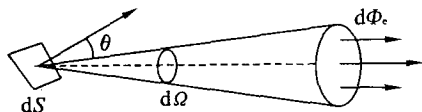


图 1-5 辐射源的辐亮度

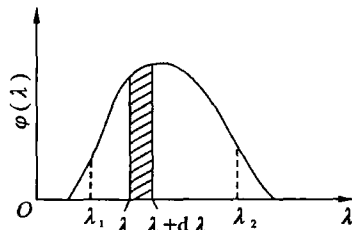


图 1-6 光谱辐射通量与波长的关系

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 λ 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 W/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:

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

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 555nm 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 507nm 处。表 1-1 给出了人眼的光谱光视效率的数值。

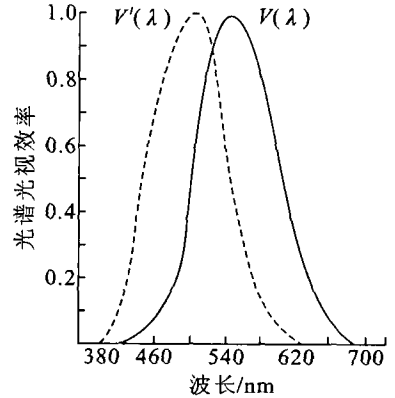


图 1-7 光谱光视效率曲线

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	0.000 04	0.000 589	590	0.757	0.065 5
390	0.000 12	0.002 209	600	0.631	0.033 15
400	0.000 4	0.009 29	610	0.503	0.015 93
410	0.001 2	0.034 84	620	0.381	0.007 37
420	0.004 0	0.096 6	630	0.265	0.003 335
430	0.011 6	0.199 8	640	0.175	0.001 497
440	0.023	0.032 81	650	0.107	0.000 677
450	0.038	0.455	660	0.061	0.000 312 9
460	0.060	0.567	670	0.032	0.000 148 0
470	0.091	0.676	680	0.017	0.000 715
480	0.139	0.793	690	0.008 2	0.000 353 3
490	0.208	0.904	700	0.004 1	0.000 017 80
500	0.323	0.982	710	0.002 1	0.000 091 4
510	0.503	0.997	720	0.001 05	0.000 047 8
520	0.710	0.935	730	0.000 52	0.000 002 546
530	0.862	0.811	740	0.000 25	0.000 001 379
540	0.954	0.650	750	0.000 12	0.000 000 760
550	0.995	0.481	760	0.000 06	0.000 000 425
560	0.995	0.328 8	770	0.000 03	0.000 000 241 3
570	0.952	0.207 6	780	0.000 015	0.000 000 139 0
580	0.870	0.121 2			

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)	Φ_e	$\Phi_e = \frac{dQ_e}{dt}$	瓦特(W)	光通量 (光功率)	Φ_v	$\Phi_v = \frac{dQ_v}{dt}$	流明(lm)
辐射强度	I_e	$I_e = \frac{d\Phi_e}{d\Omega}$	$\frac{\text{瓦特}}{\text{球面度}} (\frac{W}{sr})$	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	$M_e = \frac{d\Phi_e}{dS}$	$\frac{\text{瓦特}}{\text{米}^2} (\frac{W}{m^2})$	光出射度	M_v	$M_v = \frac{d\Phi_v}{dS}$	$\frac{\text{流明}}{\text{米}^2} (\frac{lm}{m^2})$
辐射亮度	L_e	$L_e = \frac{d^2\Phi_e}{d\Omega dS \cos\theta}$	$\frac{\text{瓦特}}{\text{球面度} \cdot \text{米}^2} (\frac{W}{sr \cdot m^2})$	光亮度	L_v	$L_v = \frac{d^2\Phi_v}{d\Omega dS \cos\theta}$	$\frac{\text{坎德拉}}{\text{米}^2} (\frac{cd}{m^2})$
辐射照度	E_e	$E_e = \frac{d\Phi_e}{dA}$	$\frac{\text{瓦特}}{\text{米}^2} (\frac{W}{m^2})$	光照度	E_v	$E_v = \frac{d\Phi_v}{dA}$	勒克斯(lx)

由于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

$$\Phi_v = K_m \cdot V(\lambda) \cdot \Phi_e(\lambda) \tag{1-20}$$

K_m 称为明视觉最大光谱光视效能,它表示人眼对波长为 555nm [$v(555) = 1$] 光辐射产生光感觉的效能。 K_m 等于 683lm/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

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

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

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

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,它是国际单位制中七个基本单位之一。其定义是发出频率为 540×10^{12} Hz (对应在空中 555 nm 波长)的纯色辐射,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 cd。

光通量的单位是流明(lm),它是发光强度为 1 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 1lm 的光通量均匀地照射在 1m^2 面积上所产生的光照度。



表 1-3 环境常见照度值

环 境	照度(lx)	环 境	照度(lx)
阳光直射	$1 \times 10^5 \sim 1.3 \times 10^5$	晨昏蒙影	10
晴天室外(无阳光直射)	$1 \times 10^4 \sim 2 \times 10^4$	暗晨昏蒙影	1
阴天室外	500 ~ 1 500	整圆明月	0.2
漆黑天	102	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 1-4 常见发光体亮度值

发光体及条件		亮度($\times 10^4 \text{cd/m}^2$)
太阳	大气外层	1.9×10^3
	海平面	1.6×10^3
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的意义。

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: $d\Phi_e$ ——面元表面 dA 在波长 λ 到 $\lambda + d\lambda$ 间隔内的辐射通量。

$M'_\lambda(\lambda, T)$ ——辐射波长 λ 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 λ 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