



普通高等教育“十一五”国家级规划教材



光电 & 仪器类专业规划教材

光电技术

(第4版)

Photoelectric Technology

Fourth Edition

王庆有 主编



中国工信出版集团



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
<http://www.phei.com.cn>

普通高等教育“十一五”国家级规划教材
工业和信息产业科技与教育专著出版资金资助出版
光电 & 仪器类专业规划教材

光电技术

(第4版)

王庆有 主编
黄战华 张存林 编
尚可可 宋振明 顾宏

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书为普通高等教育“十一五”国家级规划教材。

本书系统地介绍了光电技术的基本概念、各种光电器件的工作原理与特性、发展趋势和典型应用等。主要内容包括:光电技术基础,光电导器件,光生伏特器件,光电发射器件,热辐射探测器件,发光器件与光电耦合器件,光电信息变换,图像信息的光电变换,光电信号的数据采集与计算机接口技术,光电信息变换技术的典型应用,光电技术的新发展,以及光电信息综合实验、课程设计与毕业设计等。

本书可作为高等学校光电信息科学与工程、测控技术与仪器、空间科学与技术、海洋技术、测绘工程、机械电子工程、公安图像技术、生物医学工程等专业本科生及研究生教材,也可作为光电技术领域科技人员的参考书。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

光电技术 / 王庆有主编. —4版. —北京:电子工业出版社,2018.6

ISBN 978-7-121-19541-9

I. ①光… II. ①王… III. ①光电技术-高等学校-教材 IV. ①TN2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 087156 号

责任编辑:韩同平 特约编辑:邹凤麒 主 博 段丹辉

印 刷:三河市鑫金马印装有限公司

装 订:三河市鑫金马印装有限公司

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本:787×1092 1/16 印张:21 字数:672 千字

版 次:2005 年 4 月第 1 版

2018 年 6 月第 4 版

印 次:2018 年 6 月第 1 次印刷

定 价:59.90 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及购电话:(010)88254888, 88258888。

质量投诉请发邮件至 zlls@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

本书咨询联系方式:88254525, hantp@phei.com.cn。

第4版前言

光电技术属于信息科学的一门重要技术,是将光学技术、现代微电子技术、精密机械及计算机技术有机结合起来的新技术,已成为获取光信息或借助光提取其他信息的重要手段。它引入许多电子信息科学中的各种基本概念,如将调制与解调、放大与振荡、倍频与差频等技术移植到光频段,产生了光频段的电子技术。这一先进技术使人类能更有效地扩展自身与“机器”的视觉能力,使视觉波长响应范围不断扩展,长波限延伸到亚毫米波,短波限延伸至紫外、X射线、 γ 射线,乃至高能粒子;响应速度也在飞速提高,现在可以记录飞秒级超快速现象(如核反应、航空器发射)的变化过程;应用范围扩展到国民经济与国防科技和人类探索星际科学的各个领域。

随着自动化与智能化的发展,智能制造已经成为国家创新发展的重要发展方向,光电技术在智能制造领域不断占有举足轻重的作用,新型光电传感器不断涌现,光电技术新方法在智能制造设备中的应用也在迅猛发展。例如,利用半导体激光器与物理光学技术构成的各种光源已经得到广泛应用,几千万像元 CCD 与 CMOS 图像传感器已在工业和民用领域随处可见,热成像技术、THz 技术也被广泛应用于安检、军事工程和工业智能化领域,量子通信与量子计算机为人类认识世界发挥重要作用。光电技术已成为信息科学技术领域的重要技术。

光电技术的内容涉及光电信息与能量的转换、光电传感、检测、特种光源、计算机数据采集和处理等内容,它使基于人眼的“光学检测技术”发展成为智能化的光电检测技术。

本书为普通高等教育“十一五”国家级规划教材。

本书第1、2、3版分别于2005、2008、2013年出版,期间承蒙广大高校师生的厚爱,先后有百余所高等院校将本书选做教材或指定参考书,并得到读者大量的使用和反馈信息,提出很好的意见与建议,为第4版的编写帮助很大。

这次的第4版,作者在总结多年的教学经验基础上,适应当前“新工科”育人要求而编写。在保持第3版基本内容和特色的基础上,内容上主要有以下几个方面的变化:

(1) 贯彻教育部近期推出的一系列提高学生动脑动手能力的举措和加强实践教学环节的有关精神,从培养创新人才的角度对各章“思考题与习题”进行了较大的修改与补充,目的是增强学生自主学习的积极性,扩展知识面,强化应用意识,提高创新思维。对第6、10、12章的内容进行了较大的改动。增加了“光电信息综合实验”的内容。有些内容不必安排在课内讲授,是为教师与学生提供的参考,有利于对光电技术内容的系统掌握。

(2) 删掉了“习题解答”内容,希望读者不受约束,充分利用所学的知识,开动脑筋,自主找到“思考题与习题”答案,而且很多习题答案是多解的,尤其设计性的习题。对于各章较难的思考题与习题,作者会给出解题思路放在电子课件中。

(3) 对各章内容的阐述有所变更。本书所做的其他修订有百余处,其中大部分改动是使论述更为准确、严谨,易于阅读和理解,进一步提高教材质量。

本书具有以下特点:

- 内容全面,体系完整,结构合理,重点突出,注重应用,适应更加广泛的专业教学需要。
- 注重内容的科学性与先进性,适度增加现代光电技术应用内容,使经典理论与现代科技内容相辅相成,循序渐进,便于组织教学。
- 例题与习题的选择密切联系当今科技发展方向,使学生能充分感受课程的重要价值,提高学

习的积极性。

- 配有免费电子课件,帮助教师与学生掌握光电技术的重点内容;书中章节前标“*”的内容可根据本专业的特点选用。

本书由天津大学王庆有主编并统稿。具体写作分工为:天津大学黄战华编写第12章,并对全书的编写提出宝贵意见和建议;首都师范大学张存林编写第11章;天津工业大学尚可可编写第7章;天津工业大学宋振明、顾宏编写第6章部分内容;其余章节均由王庆有编写。

西安工业大学刘缠牢教授对书稿进行了认真细致的审校并提出了许多宝贵建议,在此表示衷心的感谢。本书在编写过程中参考了大量的国内外资料,特对这些文献的作者表示感谢。

本书在编写过程中还得到天津大学光电信息工程系许多同志和研究生的大力支持和帮助,在此特向他们表示诚挚的谢意。

感谢电子工业出版社韩同平编辑在本书编辑、出版过程中的辛勤工作和热情帮助。

由于作者水平有限,书中难免出现错误和不足,诚望读者批评指正。

作者联系方式:wqy@tju.edu.cn; QQ:2801051329

编 者

目 录

第 1 章 光电技术基础	(1)
1.1 光辐射的度量	(1)
1.1.1 与光源有关的辐度参数与光度参数	(2)
1.1.2 与接收器有关的辐度参数及光度参数	(4)
1.2 光谱辐射分布与量子流速率	(6)
1.2.1 光源的光谱辐射分布参量	(6)
1.2.2 量子流速率	(6)
1.3 物体热辐射	(7)
1.3.1 黑体辐射定律	(7)
* 1.3.2 辐射体的分类及其温度表示	(9)
1.4 辐度参数与光度参数的关系	(11)
1.4.1 人眼的视觉灵敏度	(12)
1.4.2 人眼的光谱光视效能	(12)
1.4.3 辐射体光视效能	(14)
1.5 半导体对光的吸收	(15)
1.5.1 物质对光吸收的一般规律	(15)
1.5.2 半导体对光的吸收	(16)
1.6 光电效应	(17)
1.6.1 内光电效应	(17)
1.6.2 外光电效应	(21)
思考题与习题 1	(22)
第 2 章 光电导器件	(24)
2.1 光敏电阻的原理与结构	(24)
2.2 光敏电阻的基本特性	(26)
2.3 光敏电阻的变换电路	(31)
2.3.1 基本偏置电路	(31)
2.3.2 恒流电路	(32)
2.3.3 恒压电路	(33)
2.3.4 例题	(33)
2.4 光敏电阻的应用实例	(35)
思考题与习题 2	(37)
第 3 章 光生伏特器件	(38)
3.1 硅光电二极管	(38)
3.1.1 硅光电二极管的工作原理	(38)
3.1.2 光电二极管的基本特性	(39)
3.2 其他类型的光生伏特器件	(42)

3.2.1	PIN 型光电二极管	(42)
3.2.2	雪崩光电二极管	(42)
3.2.3	硅光电池	(44)
3.2.4	光电三极管	(46)
3.2.5	色敏光伏特器件	(50)
3.2.6	光生伏特器件组合件	(52)
*3.2.7	光电位置敏感器件(PSD)	(56)
3.3	光生伏特器件的偏置电路	(60)
3.3.1	反向偏置电路	(60)
3.3.2	零伏偏置电路	(62)
3.4	半导体光电器件的特性参数与应用选择	(63)
3.4.1	半导体光电器件的特性参数	(63)
3.4.2	半导体光电器件的应用选择	(65)
	思考题与习题 3	(66)
第 4 章	光电发射器件	(68)
4.1	光电发射阴极	(68)
4.1.1	光电发射阴极的主要特性参数	(68)
*4.1.2	光电阴极材料	(69)
4.2	真空光电管与光电倍增管的工作原理	(70)
4.2.1	真空光电管的原理	(70)
4.2.2	光电倍增管的基本原理	(71)
*4.2.3	光电倍增管的结构	(71)
4.3	光电倍增管的基本特性	(73)
4.4	光电倍增管的供电电路	(79)
4.5	光电倍增管的典型应用	(81)
4.5.1	光谱探测领域的应用	(82)
*4.5.2	时间分辨荧光免疫分析中的应用	(82)
	思考题与习题 4	(84)
第 5 章	热辐射探测器件	(86)
5.1	热辐射的一般规律	(86)
5.1.1	温度变化方程	(86)
5.1.2	热电器件的最小可探测功率	(87)
5.2	热敏电阻与热电堆探测器	(88)
5.2.1	热敏电阻	(88)
5.2.2	热电偶探测器	(92)
*5.2.3	热电堆探测器	(93)
5.3	热释电器件	(95)
5.3.1	热释电器件的基本工作原理	(96)
5.3.2	热释电器件的灵敏度	(99)
5.3.3	热释电器件的噪声	(100)
5.3.4	热释电器件的类型	(101)

5.3.5 典型热释电器件	(103)
5.4 热探测器概述	(104)
思考题与习题 5	(105)
第 6 章 发光器件与光电耦合器件	(107)
6.1 LED 的基本工作原理与特性	(107)
6.1.1 LED 的发光机理	(107)
6.1.2 LED 的特性参数	(109)
6.1.3 驱动电路	(113)
6.2 LED 的应用	(114)
6.2.1 LED 绿色照明光源	(114)
6.2.2 LED 在显示方面的应用	(116)
6.3 光电耦合器件	(117)
6.3.1 光电耦合器件的结构与电路符号	(118)
6.3.2 光电耦合器件的特性参数	(120)
6.4 光电耦合器件的应用	(124)
思考题与习题 6	(126)
第 7 章 光电信息变换	(127)
7.1 光电信息变换的分类	(127)
7.1.1 光电信息变换的基本形式	(127)
7.1.2 光电信息变换的类型	(130)
7.2 光电变换电路的分类	(130)
7.2.1 模拟光电变换电路	(130)
7.2.2 模-数光电变换电路	(135)
7.3 几何光学方法的光电信息变换	(138)
7.3.1 长、宽尺寸信息的光电变换	(138)
7.3.2 位移信息的光电变换	(142)
7.3.3 速度信息的光电变换	(145)
7.4 物理光学方法的光电信息变换	(146)
7.4.1 干涉方法的光电信息变换	(146)
7.4.2 衍射方法的光电信息变换	(155)
7.5 时变光电信息的调制	(158)
7.5.1 调制的基本原理与类型	(158)
7.5.2 信号的调制	(163)
7.5.3 调制信号的解调	(166)
思考题与习题 7	(169)
第 8 章 图像信息的光电变换	(170)
8.1 图像传感器简介	(170)
8.2 光电成像原理与电视制式	(171)
8.2.1 光电成像原理	(171)
8.2.2 电视制式	(172)
8.3 电荷耦合器件	(175)

8.3.1	线阵 CCD 图像传感器	(175)
8.3.2	面阵 CCD 图像传感器	(183)
8.4	CMOS 图像传感器	(185)
8.4.1	CMOS 图像传感器的结构原理	(186)
8.4.2	典型 CMOS 图像传感器	(188)
8.5	红外热成像	(191)
8.6	图像的增强与变相	(193)
8.6.1	工作原理及其典型结构	(193)
8.6.2	性能参数	(194)
*8.6.3	像增强器的级联	(195)
	思考题与习题 8	(198)
第 9 章	光电信号的数据采集与计算机接口技术	(199)
9.1	光电信号的二值化处理	(199)
9.1.1	单元光电信号的二值化处理	(199)
9.1.2	序列光电信号的二值化处理	(200)
9.2	光电信号的二值化数据采集与接口	(202)
9.3	光电信号的量化处理与 A/D 数据采集	(204)
9.3.1	单元光电信号的量化处理	(204)
9.3.2	单元光电信号的 A/D 数据采集	(210)
9.3.3	序列光电信号的量化处理	(211)
9.3.4	序列光电信号的 A/D 数据采集与计算机接口	(214)
9.4	视频信号的 A/D 数据采集	(216)
9.4.1	基于 PC 总线的图像采集卡	(216)
9.4.2	基于 PCI 总线的图像采集卡	(220)
	思考题与习题 9	(222)
第 10 章	光电技术的典型应用	(224)
10.1	用于长度量的测量与控制	(224)
10.1.1	板材定长裁剪系统	(224)
10.1.2	钢板宽度的非接触自动测量	(225)
10.2	物体直线度与同轴度的测量技术	(227)
10.2.1	激光准直测量原理	(227)
10.2.2	不直度的测量	(229)
10.2.3	不同轴度的测量	(229)
10.3	阶梯面高度差的非接触测量技术	(230)
10.3.1	阶梯面高度差的定义	(230)
10.3.2	利用一字线激光突显阶梯面高度差	(230)
10.3.3	阶梯面高度差测量精度、稳定性与测量范围	(231)
10.4	表面粗糙度的检测方法	(232)
10.4.1	测量原理	(232)
10.4.2	检测实验装置	(233)
10.4.3	实验方法	(233)

10.5	激光多普勒测速技术	(234)
10.5.1	多普勒测速原理	(234)
10.5.2	激光多普勒测速仪的组成	(236)
10.5.3	激光多普勒测速技术的应用	(238)
10.5.4	多普勒全场测速技术	(239)
10.6	光电搜索、跟踪与制导应用	(241)
10.6.1	搜索仪与跟踪仪	(241)
10.6.2	激光制导	(243)
10.6.3	红外跟踪制导	(244)
10.7	光学传递函数检测技术	(246)
10.7.1	OTF 的基本概念	(247)
10.7.2	测定 OTF 的扫描调制法	(248)
10.7.3	光电傅里叶分析 OTF 测定仪	(249)
10.8	光学系统透过率测试技术	(251)
10.8.1	透过率	(251)
10.8.2	望远系统透过率的测量	(252)
10.8.3	照相物镜透过率的测量	(253)
10.9	印刷出版工业中的光电技术	(254)
10.9.1	激光照排系统	(254)
10.9.2	激光雕刻凸版和凹版机	(255)
10.9.3	激光打印机和复印机	(256)
10.9.4	光盘存储	(258)
10.10	医用图像传感器检测技术	(261)
10.10.1	X 射线图像增强器	(261)
10.10.2	医用图像传感器的应用	(264)
	思考题与习题 10	(267)
第 11 章	光电技术的新发展	(268)
11.1	泵浦探测技术	(268)
11.2	频率上转换光电探测技术	(274)
11.3	光电技术的发展趋势	(281)
11.3.1	光电技术的若干进展	(281)
11.3.2	光电技术的应用	(283)
11.3.3	世界光电子技术发展趋势	(290)
	思考题与习题 11	(291)
	本章参考文献	(291)
第 12 章	光电信息综合实验与设计	(293)
12.1	光电信息综合实验	(293)
12.1.1	非接触测量物体位置与振动参数实验系统的原理	(293)
12.1.2	非接触测量物体位置与振动参数实验的内容	(295)
12.1.3	数据分析与实验总结	(300)
12.2	光电技术课程设计	(300)

12.2.1	辐射体光谱分布与探测器的光谱响应	(301)
12.2.2	光纤光功率计的课程设计	(301)
12.2.3	典型光电技术课程设计案例	(303)
12.3	毕业设计	(305)
12.3.1	红外遥控开关的设计	(305)
12.3.2	应用线阵 CCD 实现钢珠的自动筛选	(315)
参考文献		(324)

第 1 章 光电技术基础

光电信息变换技术总要讨论各种光电敏感器件,对这些光电敏感器件的性能评估和应用说明都离不开光的度量与光电技术的基本理论。本章在讨论光的基本度量方法和度量参数的基础上,还将讨论物体热辐射的基本定律、光与物质作用产生的各种光电效应等问题,为学习光电信息变换技术打下基础。

光电技术最基本的理论是光的波粒二象性。即光是以电磁波方式传播的粒子。几何光学依据光的波动性研究光的折射与反射规律,得出关于光的传播、光学成像、光学成像系统和成像系统像差等理论。物理光学依据光的波动性成功地解释了光的干涉、衍射等现象,为光谱分析仪器、全息摄影技术奠定理论基础。然而,光的本质是物质,它具有粒子性,又称为光量子或光子。光子具有动量与能量,并分别表示为

$$p = h\nu/c, E = h\nu$$

式中, $h = 6.626 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$, 为普朗克常数; ν 为光的振动频率 (s^{-1}); $c = 3 \times 10^8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 为光在真空中的传播速度。

光的量子性成功地解释了光与物质作用时所引起的光电效应,而光电效应又充分证明了光的量子性。

图 1-1 所示为电磁波按波长的分布及各波长区域的定义,称为电磁波谱。电磁波谱的频率范围很宽:从宇宙射线到无线电波 ($10^2 \sim 10^{25} \text{ Hz}$)。光辐射仅仅是电磁波谱中的一小部分,它包括的波长区域从几纳米到几毫米,即 $10^{-9} \sim 10^{-3} \text{ m}$ 量级。只有波长为 $0.38 \sim 0.78 \mu\text{m}$ 的光才能引起人眼的视觉感,故称这部分光为可见光。

光电敏感器件的光谱响应范围远远超出人眼的视觉范围,一般从 X 光到红外辐射甚至于远红外、毫米波的范围。特种材料的热电器件具有超过厘米波光谱响应的范围,即人们可以借助于各种光电敏感器件对整个光辐射波谱范围内的光信息进行光电变换。

电磁波名称	λ (m)
宇宙射线	10^{-14}
	10^{-13}
γ 射线	10^{-12}
	10^{-11}
X 光	10^{-10}
	10^{-9}
紫外辐射	10^{-8}
	10^{-7}
可见光谱	10^{-6}
红外辐射	10^{-5}
	10^{-4}
毫米波	10^{-4}
厘米波	10^{-3}
无线电波	10^{-2}
	10^{-1}
	10^0
	10^1
	10^2

图 1-1 电磁波谱

1.1 光辐射的度量

为了定量分析光与物质相互作用所产生的光电效应,分析光电敏感器件的光电特性,以及用光电敏感器件进行光谱、光度的定量计算,常需要对光辐射给出相应的计量参数和量纲。光辐射的度量方法有两种:一种是物理(或客观)的计量方法,称为辐度学计量方法或辐度参数,它适用于整个电磁辐射谱区,对辐射量进行物理的计量;另一种是生理(主观)的计量方法,是以人眼所能见到的光对大脑的刺激程度来对光进行计量的方法,称为光度参数。光度参数只适用于 $0.38 \sim 0.78 \mu\text{m}$ 的可见光谱区域,是对光强度的主观评价,超过这个谱区,光度参数没有任何意义。

辐度参数与光度参数在概念上虽不一样,但它们的计量方法却有许多相同之处,为学习和讨论方便,常用相同的符号表示辐度参数与光度参数。为区别它们,常在对应符号的右下角标以“e”表

示辐度参数,标以“v”表示光度参数。

1.1.1 与光源有关的辐度参数与光度参数

与光源有关的辐度参数是指计量光源在辐射波长范围内发射连续光谱或单色光谱能量的参数。

1. 辐能和光能

以辐射形式发射、传播或接收的能量称为辐能,用符号 Q_e 表示,其计量单位为焦耳(J)。

光能是光通量在可见光范围内对时间的积分,以 Q_v 表示,其计量单位为流明秒(lm·s)。

2. 辐通量和光通量

辐通量或辐功率是以辐射形式发射、传播或接收的功率;或者说,在单位时间内,以辐射形式发射、传播或接收的辐能称为辐通量,以符号 Φ_e 表示,其计量单位为瓦(W),即

$$\Phi_e = \frac{dQ_e}{dt} \quad (1.1-1)$$

若在 t 时间内所发射、传播或接收的辐能不随时间改变,则式(1.1-1)可简化为

$$\Phi_e = Q_e/t \quad (1.1-2)$$

对可见光,光源表面在无穷小时间段内发射、传播或接收的所有可见光谱,其光能被无穷短时间间隔 dt 来除,其商定义为光通量 Φ_v ,即

$$\Phi_v = \frac{dQ_v}{dt} \quad (1.1-3)$$

若在 t 时间内发射、传播或接收的光能不随时间改变,则式(1.1-3)简化为

$$\Phi_v = Q_v/t \quad (1.1-4)$$

Φ_v 的计量单位为流(明)(lm)。

显然,辐通量对时间的积分称为辐能,而光通量对时间的积分称为光能。

3. 辐出度和光出度

对面积为 A 的有限面光源,表面某点处的面元向半球面空间发射的辐通量 $d\Phi_e$ 与该面元面积 dA 之比,定义为辐出度 M_e ,即

$$M_e = \frac{d\Phi_e}{dA} \quad (1.1-5)$$

M_e 的计量单位是瓦每平方米 [W/m^2]。

由式(1.1-5)可得,面光源 A 向半球面空间发射的总辐通量为

$$\Phi_e = \int_{(A)} M_e dA \quad (1.1-6)$$

对于可见光,面光源 A 表面某一点处的面元向半球面空间发射的光通量 $d\Phi_v$ 与面元面积 dA 之比,称为光出度 M_v ,即

$$M_v = \frac{d\Phi_v}{dA} \quad (1.1-7)$$

其计量单位为勒[(lx)或(lm/m²)]。

对均匀发射辐射的面光源有

$$M_v = \Phi_v/A \quad (1.1-8)$$

由式(1.1-7)可得,面光源向半球面空间发射的总光通量为

$$\Phi_v = \int_{(A)} M_v dA \quad (1.1-9)$$

4. 辐强度和发光强度

对点光源在给定方向的立体角元 $d\Omega$ 内发射的辐通量 $d\Phi_e$, 与该方向立体角元 $d\Omega$ 之比, 定义为点光源在该方向的辐强度 I_e , 即

$$I_e = \frac{d\Phi_e}{d\Omega} \quad (1.1-10)$$

辐强度的计量单位为瓦每球面度 (W/sr)。

点光源在有限立体角 Ω 内发射的辐通量为

$$\Phi_e = \int_{\Omega} I_e d\Omega \quad (1.1-11)$$

各向同性的点光源向所有方向发射的总辐通量为

$$\Phi_e = I_e \int_0^{4\pi} d\Omega = 4\pi I_e \quad (1.1-12)$$

对可见光, 与式(1.1-10)类似, 定义发光强度为

$$I_v = \frac{d\Phi_v}{d\Omega} \quad (1.1-13)$$

对各向同性的点光源向所有方向发射的总光通量为

$$\Phi_v = \int_{\Omega} I_v d\Omega \quad (1.1-14)$$

一般点光源是各向异性的, 其发光强度分布随方向而异。

发光强度的单位是坎德拉 (candela), 简称为坎 [cd]。1979 年第十六届国际计量大会通过决议, 将坎德拉重新定义为: 在给定方向上能发射 $540 \times 10^{12} \text{ Hz}$ 的单色辐射源, 在此方向上的辐强度为 $(1/683) \text{ W/sr}$, 其发光强度定义为 1cd。

由式(1.1-14)可得, 对发光强度为 1cd 的点光源, 向给定方向 1sr (球面度) 内发射的光通量, 定义为 1lm (流明)。发光强度为 1cd 的点光源在整个球空间所发出的总光通量为

$$\Phi_v = 4\pi I_v = 12.566 \text{ lm}$$

5. 辐亮度和亮度

光源表面某一点处的面元在给定方向上的辐强度, 除以该面元在垂直于给定方向平面上的正投影面积, 称为辐亮度 L_e , 即

$$L_e = \frac{dI_e}{dA \cos\theta} = \frac{d^2\Phi_e}{d\Omega dA \cos\theta} \quad (1.1-15)$$

式中, θ 为给定方向与面元法线之间的夹角。辐亮度 L_e 的计量单位为瓦每球面度平方米 [$W/(sr \cdot m^2)$]。

对可见光, 亮度 L_v 定义为: 光源表面某一点处的面元在给定方向上的发光强度, 除以该面元在垂直给定方向平面上的正投影面积, 即

$$L_v = \frac{dI_v}{dA \cos\theta} = \frac{d^2\Phi_v}{d\Omega dA \cos\theta} \quad (1.1-16)$$

L_v 的计量单位是坎德拉每平方米 (cd/m^2)。

若 L_e, L_v 与光源发射辐射的方向无关, 且可由式(1.1-15)、式(1.1-16)表示, 则这样的光源称为余弦辐射体或朗伯辐射体。黑体是一个理想的余弦辐射体, 而一般光源的亮度与方向有关。粗糙表面的辐射体或反射体及太阳等是一个近似的余弦辐射体。

余弦辐射体表面某面元 dA 处向半球面空间发射的通量为

$$d\Phi = \iint L \cos\theta dA d\Omega$$

式中, $d\Omega = \sin\theta d\theta d\varphi$ 。

对上式在半球面空间内积分

$$d\Phi = L dA \int_{\varphi=0}^{2\pi} d\varphi \int_{\theta=0}^{\pi/2} \sin\theta \cos\theta d\theta = \pi L dA$$

由上式得到余弦辐射体的 M_e 与 L_e 、 M_v 与 L_v 的关系为

$$L_e = M_e / \pi \quad (1.1-17)$$

$$L_v = M_v / \pi \quad (1.1-18)$$

6. 辐效率与发光效率

光源所发射的总辐通量 Φ_e , 与外界提供给光源的功率 P 之比, 称为光源的辐效率 η_e ; 光源发射的总光通量 Φ_v , 与提供的功率 P 之比, 称为发光效率 η_v 。即

$$\eta_e = \Phi_e / P \times 100\% \quad (1.1-19)$$

$$\eta_v = \Phi_v / P \times 100\% \quad (1.1-20)$$

辐效率 η_e 无量纲, 发光效率 η_v 的计量单位是流明每瓦 ($\text{lm} \cdot \text{W}^{-1}$)。

对限定在波长 $\lambda_1 \sim \lambda_2$ 范围内的辐效率为

$$\eta_{e,\Delta\lambda} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \Phi_{e,\lambda} d\lambda / P \times 100\% \quad (1.1-21)$$

式中, $\Phi_{e,\lambda}$ 称为光源辐通量的光谱密集度, 简称为光谱辐通量。

1.1.2 与接收器有关的辐度参数及光度参数

从接收器的角度讨论辐度与光度的参数, 称为与接收器有关的辐度参数及光度参数。接收器可以是探测器, 也可以是反射辐射的反射器, 或两者兼有的器件。与接收器有关的辐度参数与光度参数有以下两种。

1. 辐照度与照度

将照射到物体表面某一点处面元的辐通量 $d\Phi_e$ 除以该面元的面积 dA 的商, 称为辐照度 e_e , 即

$$e_e = \frac{d\Phi_e}{dA} \quad (1.1-22)$$

e_e 的计量单位是瓦每平方米 (W/m^2)。

若辐通量是均匀地照射在物体表面上的, 则式(1.1-22)可简化为

$$E_e = \Phi_e / A \quad (1.1-23)$$

注意, 不要把辐照度 E_e 与辐出度 M_e 混淆起来。虽然两者单位相同, 但定义不一样。辐照度是从物体表面接收辐通量的角度来定义的, 辐出度是从面光源表面发射辐射的角度来定义的。

本身不辐射的反射体接收辐射后, 吸收一部分, 反射一部分。若把反射体当做辐射体, 则光谱辐出度 $M_{er}(\lambda)$ (下标 r 代表反射) 与辐射体接收的光谱辐照度 $E_e(\lambda)$ 的关系为

$$M_{er} = \rho_e(\lambda) E_e(\lambda) \quad (1.1-24)$$

式中, $\rho_e(\lambda)$ 为辐度光谱反射比, 是波长的函数。

将式(1.1-24)对波长积分, 得到反射体的辐出度

$$M_e = \int \rho_e(\lambda) E_e d\lambda \quad (1.1-25)$$

对可见光,用照射到物体表面某一面元的光通量 $d\Phi_v$,除以该面元面积 dA 的商,称为光照度 e_v ,即

$$e_v = \frac{d\Phi_v}{dA}$$

或表示为

$$E_v = \Phi_v / A \quad (1.1-26)$$

E_v 的计量单位是勒(克司)(lx)。

对接收光的反射体,同样有

$$m_v(\lambda) = \rho_v(\lambda) E_v(\lambda) \quad (1.1-27)$$

或者

$$M_v(\lambda) = \int \rho_v(\lambda) E_v(\lambda) d\lambda \quad (1.1-28)$$

式中, $\rho_v(\lambda)$ 为光度光谱反射比,是波长的函数。

2. 辐照量和曝光量

辐照量与曝光是光电接收器接收辐能量的重要度量参数。光电器件的输出信号大小与所接收的入射辐能量有关。

将照射到物体表面某一面元的辐照度 E_e 在时间 t 内的积分称为辐照量 H_e ,即

$$H_e = \int_0^t E_e dt \quad (1.1-29)$$

H_e 的计量单位是焦每平方米(J/m^2)。

如果面元上的辐照度 E_e 与时间无关,则式(1.1-29)可简化为

$$H_e = E_e t \quad (1.1-30)$$

与辐照量 H_e 对应的光度量是曝光量 H_v ,它定义为物体表面某一面元接收的光照度 E_v 在时间 t 内的积分,即

$$H_v = \int_0^t E_v dt \quad (1.1-31)$$

H_v 的计量单位是勒(克司)秒($lx \cdot s$)。

如果面元上的光照度 E_v 与时间无关,则式(1.1-31)可简化为

$$H_v = E_v t$$

上面讨论的辐度参数和光度参数的基本定义与基本计量公式,都是对辐射源发出的辐能量的度量,是从不同角度来定义的,为了便于学习掌握这些参数,将其汇总成如表 1-1 所示的辐度量与光度量的定义。

表 1-1 辐度量与光度量的定义

辐度参量				光度参量			
量的名称	量的符号	量的定义	单位符号 (单位名称)	量的名称	量的符号	量的定义	单位符号 (单位名称)
辐能	Q_e		J[焦]	光量	Q_v		$lm \cdot s$ [流秒]
辐通量 (辐功率)	Φ_e	$\Phi_e = \frac{dQ_e}{dt}$	W [瓦]	光通量 (光功率)	Φ_v	$\Phi_v = \frac{dQ_v}{dt}$	lm[流]
辐出度	M_e	$M_e = \frac{d\Phi_e}{dA}$	W/m^2 [瓦每平方米]	光出度	M_v	$M_v = \frac{\Phi_v}{A}$	lm/m^2 [流每平方米]
辐强度	I_e	$I_e = \frac{d\Phi_e}{d\Omega}$	W/sr [瓦每球面度]	发光强度	I_v	$I_v = \frac{d\Phi_v}{d\Omega}$	cd[坎]

辐度参量				光度参量			
辐亮度	L_e	$L_e = \frac{I_e}{dA \cos \theta} = \frac{d^2 \Phi_e}{d\Omega dA \cos \theta}$	$W / (sr \cdot m^2)$ [瓦每球面度平方米]	光亮度	L_v	$L_v = \frac{I_v}{dA \cos \alpha} = \frac{d^2 \Phi_v}{d\Omega dA \cos \theta}$	cd/m^2 [坎每平方米]
辐照度	E_e	$E_e = \frac{d\Phi_e}{dA}$	W/m^2 [瓦每平方米]	光照度	E_v	$E_v = \frac{d\Phi_v}{dA}$	lx[勒]
辐照量	H_e	$H_e = \int_0^t E_e dt$	J/m^2 [焦每平方米]	曝光量	H_v	$H_v = \int_0^t E_v dt$	lx·s[勒秒]

1.2 光谱辐射分布与量子流速率

1.2.1 光源的光谱辐射分布参量

光源发射的辐能在辐射光谱范围内是按波长分布的。光源在单位波长范围内发射的辐射量称为辐射量的光谱密度 $X_{e,\lambda}$, 简称为光谱辐射量, 即

$$X_{e,\lambda} = \frac{dx_e}{d\lambda} \quad (1.2-1)$$

式中, 通用符号 $X_{e,\lambda}$ 是波长的函数, 代表所有的光谱辐射量, 如光谱辐通量 $\Phi_{e,\lambda}$ 、光谱辐出度 $M_{e,\lambda}$ 、光谱辐强度 $I_{e,\lambda}$ 、光谱辐亮度 $L_{e,\lambda}$ 、光谱辐照度 $E_{e,\lambda}$ 等。

同样, 以符号 $X_{v,\lambda}$ 表示光源在可见光区单位波长范围内发射的光度量, 称为光度量的光谱密度, 简称为光谱光度量, 即

$$X_{v,\lambda} = \frac{dX_v}{d\lambda} \quad (1.2-2)$$

式中, $X_{v,\lambda}$ 代表光谱光通量 $\Phi_{v,\lambda}$ 、光谱光出度 $M_{v,\lambda}$ 、光谱发光强度 $I_{v,\lambda}$ 或光谱光照度 $E_{v,\lambda}$ 等。

光源的辐度参量 $X_{e,\lambda}$ 随波长 λ 的分布曲线, 称为该光源的绝对光谱辐射分布曲线。该曲线任一波长 λ 处的 $X_{e,\lambda}$ 除以峰值波长 λ_{\max} 处的光谱辐射量最大值 $X_{e,\lambda_{\max}}$ 的商 X_{e,λ_r} , 称为光源的相对光谱辐射量, 即

$$X_{e,\lambda_r} = X_{e,\lambda} / X_{e,\lambda_{\max}} \quad (1.2-3)$$

相对光谱辐射量 X_{e,λ_r} 与波长 λ 的关系称为光源的相对光谱辐射分布。

光源在波长 $\lambda_1 \sim \lambda_2$ 范围内发射的辐通量为

$$\Delta\Phi_e = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \Phi_{e,\lambda} d\lambda$$

若积分区间范围为 $\lambda_1 = 0 \sim \lambda_2 \rightarrow \infty$, 得到光源发出的所有波长的总辐通量为

$$\Phi_e = \int_0^{\infty} \Phi_{e,\lambda} d\lambda = \Phi_{e,\lambda_{\max}} \int_0^{\infty} \Phi_{e,\lambda_r} d\lambda \quad (1.2-4)$$

光源在波长 $\lambda_1 \sim \lambda_2$ 之间的辐通量 $\Delta\Phi_e$ 与总辐通量 Φ_e 之比称为该光源的比辐射 q_e , 即

$$q_e = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \Phi_{e,\lambda} d\lambda / \int_0^{\infty} \Phi_{e,\lambda} d\lambda \quad (1.2-5)$$

式中, q_e 没有量纲。

1.2.2 量子流速率

光源发射的辐功率是每秒发射光子能量的总和。光源在给定波长 λ 处, 将 $\lambda \sim \lambda + d\lambda$ 范围内发