




普通高等教育“十三五”规划教材
光电信息科学与工程类专业规划教材

光电技术简明教程

王庆有 主编

刘伟 李百明 尚可可 王仰江 郝玉良 黄战华 编

梁外借

 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“十三五”规划教材
光电信息科学与工程类专业规划教材

光电技术简明教程

王庆有 主编

刘 伟 李百明 尚可可 编
王仰江 郝玉良 黄战华



电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书是在《光电技术》(第3版)的基础上精简而成的,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、发展与典型应用等。本书共11章,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,光电技术典型应用,光电技术课程设计与光电信息综合实验。本教材尽量贴合“新工科”理念与“专业群”建设思想,努力为培养高素质工程技术人才服务。

本书可作为光电信息科学与工程、测控技术与仪器、计量测试仪器、机械电子工程等专业的教材,也可作为光电技术领域科技人员的技术参考书。

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

光电技术简明教程/王庆有主编. —北京:电子工业出版社,2017.12

光电信息科学与工程类专业规划教材

ISBN 978-7-121-32843-5

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(2017)第244145号

责任编辑:韩同平 特约编辑:李佩乾 李宪强 宋 薇

印 刷:北京虎彩文化传播有限公司

装 订:北京虎彩文化传播有限公司

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:16 字数:512千字

版 次:2017年12月第1版

印 次:2018年8月第2次印刷

定 价:44.90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,联系及邮购电话:(010)88254888, 88258888。

质量投诉请发邮件至 zlt@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。

前 言

“新工科”引导高校教育改革的深入,“光电技术”课程将随着教育改革的深入而被更多的专业选用。综合考虑不同类型专业对“光电技术”课程内容的需要,编写适当减少理论推导、注重实际应用的简明教材是必要的。

本书是在《光电技术(第3版)》的基础上的简化、精炼,强化实用性,引导学生加深对重点内容的理解与掌握,提高创新设计的能力。希望老师在使用教材时贯彻“以教师为主,以教材为辅”的原则,让学生在掌握基本理论基础上提高分析问题、解决问题的能力。每章后面配有思考题与习题,既便于消化基本理论,又能为实际应用提供参考。其中一些题目是校企合作中企业教师提出来的,有很强的实用价值,需要学生在深入学习领会内容之后才能完成;一些题目的答案不是唯一的,也希望选用本教材的教师不要追求“标准答案”。

本书共11章,第1章介绍光电技术基础理论,第2~5章分别介绍光敏电阻、光生伏特器件、光电发射器件和热电器件等各种光电传感器的基本工作原理、特性、变换电路和应用,第6章介绍发光器件与光电耦合器件,第7章讲述光电信息变换的基本方式、方法与分类,第8章讲述图像信息的光电变换,第9章是光电信号的数据采集与计算机接口技术,第10章讲述光电技术的典型应用,第11章为光电技术课程设计与光电信息综合实验的内容。

本教材是作者在闽南理工学院与福建中策光电有限公司(省级创新企业)、福建晶安光电有限公司、福建天电光电有限公司、福建富达精密科技有限公司、晋江兴翼机械有限公司和福建省石狮市通达电器有限公司等企业开展校企合作育人,尤其是与石狮市通达电器有限公司共建“质量工程班”(校企共同培养质量工程师)教学合作过程中编写出的。参加编写工作的还有刘伟(第5章)、李百明(第8章)、王仰江(第4章)、尚可可(第7章)、郝玉良(第3章)和黄占华(第11章部分内容)。这些教师分别承担过光电技术、图像传感器应用技术、数字图像处理技术、光电显示技术与机器视觉技术等课程的教学工作,指导过学生做光电技术课程设计、大学生创新创业训练项目、光电大赛项目以及与光电相关课题的毕业设计工作,使简明教程与实际应用结合得更加紧密。

感谢闽南理工学院光电与机电工程学院及地方合作企业的同事们给予本书编写的大力支持和帮助。感谢天津工业大学理学院与天津大学的支持与帮助。

感谢电子工业出版社韩同平编辑在本书编辑、校对与出版过程中的辛勤工作与热情帮助!因作者水平有限,时间仓促,书中难免出现错误和不足,诚望读者批评指正。

作者联系方法:wqy@tju.edu.cn

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 与光源有关的辐射度参数与光度参数	(2)
1.1.2 与接收器有关的辐射度参数及光度参数	(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	(7)
1.3 物体热辐射	(8)
1.3.1 黑体辐射定律	(8)
1.3.2 辐射体的分类	(10)
1.4 辐射度参数与光度参数的关系	(10)
1.4.1 人眼的视觉灵敏度	(11)
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 半导体吸收光的规律	(15)
1.6 光电效应	(16)
1.6.1 内光电效应	(17)
1.6.2 光电发射效应	(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	(27)
2.3 光敏电阻的变换电路	(32)
2.3.1 基本偏置电路	(32)
2.3.2 恒流电路	(33)
2.3.3 恒压电路	(34)
2.3.4 例题	(34)
2.4 光敏电阻的应用实例	(36)
2.4.1 照明灯的光电控制电路	(36)
2.4.2 火焰探测报警器	(36)

2.4.3 照相机电子快门	(37)
思考题与习题 2	(38)
第 3 章 光生伏特器件	(40)
3.1 硅光电二极管	(40)
3.1.1 硅光电二极管的工作原理	(40)
3.1.2 光电二极管的基本特性	(41)
3.2 其他类型的光生伏特器件	(44)
3.2.1 PIN 型光电二极管	(44)
3.2.2 雪崩光电二极管	(45)
3.2.3 硅光电池	(47)
3.2.4 光电三极管	(50)
3.2.5 色敏光生伏特器件	(53)
3.2.6 光生伏特器件组合件	(56)
*3.2.7 光电位置敏感器件(PSD)	(60)
3.3 光生伏特器件的偏置电路	(65)
3.3.1 反向偏置电路	(65)
3.3.2 零伏偏置电路	(67)
3.4 半导体光电器件的特性参数与选择	(68)
3.4.1 半导体光电器件的特性参数	(68)
3.4.2 半导体光电器件的应用选择	(69)
思考题与习题 3	(71)
第 4 章 光电发射器件	(73)
4.1 光电发射阴极	(73)
4.1.1 光电发射阴极的主要特性参数	(73)
*4.1.2 光电阴极材料	(74)
4.2 真空光电管与光电倍增管的工作原理	(76)
4.2.1 真空光电管的原理	(76)
4.2.2 光电倍增管的基本原理	(76)
4.2.3 光电倍增管的结构	(77)
4.3 光电倍增管的基本特性	(79)
4.4 光电倍增管的供电电路	(85)
4.5 光电倍增管的典型应用	(88)
4.5.1 光谱探测领域的应用	(88)
*4.5.2 时间分辨荧光免疫分析中的应用	(89)
思考题与习题 4	(91)
第 5 章 热辐射探测器件	(93)
5.1 热辐射的一般规律	(93)

5.1.1	温度变化方程	(93)
5.1.2	热电器件的最小可探测功率	(94)
5.2	热敏电阻与热电堆探测器	(95)
5.2.1	热敏电阻	(95)
5.2.2	热电偶探测器	(99)
*5.2.3	热电堆探测器	(101)
5.3	热释电器件	(103)
5.3.1	热释电器件的基本工作原理	(104)
5.3.2	热释电器件的灵敏度	(107)
5.3.3	热释电器件的噪声	(108)
5.3.4	热释电器件的类型	(110)
5.3.5	典型热释电器件	(112)
5.4	热探测器概述	(114)
	思考题与习题 5	(114)
第 6 章	发光器件与光电耦合器件	(116)
6.1	LED 的基本工作原理与特性	(116)
6.2	LED 的应用	(124)
6.2.1	LED 绿色照明光源	(124)
6.2.2	LED 在显示方面的应用	(126)
6.3	光电耦合器件	(127)
6.3.1	光电耦合器件的结构与电路符号	(127)
6.3.2	光电耦合器件的特性参数	(129)
6.4	光电耦合器件的应用	(133)
	思考题与习题 6	(136)
第 7 章	光电信息变换	(137)
7.1	光电信息变换的分类	(137)
7.1.1	光电信息变换的基本形式	(138)
7.1.2	光电信息变换的类型	(140)
7.2	光电变换电路的分类	(141)
7.2.1	模拟光电变换电路	(141)
7.2.2	模-数光电变换电路	(147)
7.3	几何光学方法的光电信息变换	(147)
7.3.1	长、宽尺寸信息的光电变换	(147)
7.3.2	位移信息的光电变换	(148)
7.3.3	速度信息的光电变换	(148)
7.4	物理光学方法的光电信息变换	(150)
7.4.1	干涉方法的光电信息变换	(150)

7.4.2	衍射方法的光电信息变换	(151)
7.5	时变光电信息的调制	(152)
7.5.1	调制的基本原理与类型	(152)
7.5.2	信号的调制	(155)
7.5.3	调制信号的解调	(156)
	思考题与习题 7	(156)
第 8 章	图像信息的光电变换	(158)
8.1	图像传感器简介	(158)
8.2	光电成像原理与电视制式	(159)
8.2.1	光电成像原理	(159)
8.2.2	电视制式	(161)
8.3	电荷耦合器件	(164)
8.3.1	线阵 CCD 图像传感器	(164)
8.3.2	面阵 CCD 图像传感器	(172)
8.4	CMOS 图像传感器	(175)
8.4.1	CMOS 成像器件的结构原理	(175)
8.4.2	典型 CMOS 图像传感器	(178)
8.5	热成像器件	(178)
8.5.1	点扫描式热释电热像仪	(178)
8.5.2	热释电摄像管的基本结构	(178)
8.5.3	典型热像仪	(179)
8.6	图像的增强与变像	(181)
8.6.1	工作原理及其典型结构	(181)
8.6.2	性能参数	(181)
8.6.3	像增强器的级联	(183)
	思考题与习题 8	(183)
第 9 章	光电信号的数据采集与计算机接口技术	(185)
9.1	光电信号的二值化处理	(185)
9.1.1	单元光电信号的二值化处理	(185)
9.1.2	序列光电信号的二值化处理	(187)
9.2	光电信号的二值化数据采集与接口	(189)
9.2.1	硬件二值化数据采集电路	(189)
9.2.2	边沿送数法二值化数据电路	(190)
9.3	光电信号的量化处理与 A/D 数据采集	(191)
9.3.1	单元光电信号的量化处理	(191)
9.3.2	单元光电信号的 A/D 数据采集	(197)
9.3.3	序列光电信号的 A/D 数据采集与计算机接口	(199)

思考题与习题 9	(202)
第 10 章 光电技术的典型应用	(203)
10.1 用于长度量的测量与控制	(203)
10.1.1 板材定长裁剪系统	(203)
10.1.2 钢板宽度的非接触自动测量	(204)
10.2 光电准直技术测量物体的直线度与同轴度	(207)
10.2.1 激光准直测量原理	(207)
10.2.2 不直度的测量	(209)
10.2.3 不同轴度的测量	(209)
10.3 阶梯面高度差的非接触测量技术	(210)
10.3.1 阶梯面高度差的定义	(210)
10.3.2 利用一字线激光突显阶梯面高度差	(211)
10.3.3 阶梯面高度差测量精度、稳定性与测量范围	(212)
10.4 表面粗糙度的检测方法	(212)
10.4.1 测量原理	(213)
10.4.2 检测实验装置	(214)
10.4.3 实验方法	(214)
10.5 激光多普勒测速技术	(215)
10.5.1 多普勒测速原理	(215)
10.5.2 激光多普勒测速仪的组成	(217)
10.5.3 激光多普勒测速技术的应用	(220)
10.5.4 多普勒全场测速技术	(221)
10.6 光电搜索、跟踪与制导应用	(223)
10.6.1 搜索仪与跟踪仪	(223)
10.6.2 激光制导	(225)
10.6.3 红外跟踪制导	(226)
10.7 光学系统透过率测试技术	(226)
10.7.1 透过率	(226)
10.7.2 望远系统透过率的测量	(227)
10.7.3 照相物镜透过率的测量	(227)
10.8 光电技术在印刷出版工业中的应用	(227)
10.8.1 激光照排系统	(227)
10.8.2 激光雕刻凸版和凹版机	(228)
10.8.3 激光打印机和复印机	(228)
10.8.4 光盘存储	(228)
思考题与习题 10	(230)

第 11 章 光电技术课程设计与光电信息综合实验	(231)
11.1 光电技术课程设计	(231)
11.1.1 辐射体光谱分布与探测器	(231)
11.1.2 光纤光功率计的课程设计	(232)
11.1.3 典型光电技术课程设计案例	(234)
11.2 光电信息综合实验	(236)
11.2.1 非接触测量物体位置与振动参数实验系统的原理	(237)
11.2.2 非接触测量物体位置与振动参数实验的内容	(239)
11.2.3 数据分析与实验总结	(244)
思考题与习题 11	(244)
参考文献	(245)

第 1 章 光电技术基础

光电技术的基本理论是建立在光的波粒二象性之上的。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了光的折射与反射规律,得到了许多关于光的传播、光学成像、光学成像系统和像差等理论。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、全息摄影技术奠定了理论基础。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}
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,称为辐射度学计量方法或辐射度参数,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。

辐射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射度参数与光度参数。为区别它们,常在对应符号的右下角标以“e”表示辐射度参数,标以“v”表示光度参数。

1.1.1 与光源有关的辐射度参数与光度参数

与光源有关的辐射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(射)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($\text{lm} \cdot \text{s}$)。

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

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

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

$$\Phi_e = Q_e/t \quad (1-2)$$

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

$$\Phi_v = \frac{dQ_v}{dt} \quad (1-3)$$

若在 t 时间内发射、传播或接收的光能不随时间改变,则式(1-3)简化为

$$\Phi_v = Q_v/t \quad (1-4)$$

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(射)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内发射的辐通量 $d\Phi_e$ 与该面元面积 dA 之比,定义为辐出度 M_e ,即

$$M_e = \frac{d\Phi_e}{dA} \quad (1-5)$$

M_e 的计量单位是瓦(特)每平方米 [W/m^2]。

由式(1-5)可得,面光源 A 向半球面空间发射的总辐通量为

$$\Phi_e = \int_{(A)} M_e dA \quad (1-6)$$

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

$$M_v = \frac{d\Phi_v}{dA} \quad (1-7)$$

其计量单位为勒(克司) [(lx) 或 (lm/m²)]。

对均匀发射辐射的面光源有

$$M_v = \Phi_v/A \quad (1-8)$$

由式(1-7)可得,面光源向半球面空间发射的总光通量为

$$\Phi_v = \int_{(A)} M_v dA \quad (1-9)$$

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

$$I_e = \frac{d\Phi_e}{d\Omega} \quad (1-10)$$

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

$$\Phi_e = \int_{\Omega} I_e d\Omega \quad (1-11)$$

各向同性的点光源向所有方向发射的总辐通量为

$$\Phi_e = I_e \int_0^{4\pi} d\Omega = 4\pi I_e \quad (1-12)$$

对可见光,与式(1-10)类似,定义发光强度为

$$I_v = \frac{d\Phi_v}{d\Omega} \quad (1-13)$$

对各向同性的点光源向所有方向发射的总光通量为

$$\Phi_v = \int_{\Omega} I_v d\Omega \quad (1-14)$$

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 540×10^{12} Hz 的单色辐射源,在此方向上的辐强度为 (1/683) W/sr,其发光强度定义为 1cd。

由式(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

$$L_e = \frac{dI_e}{dA \cos\theta} = \frac{d^2\Phi_e}{d\Omega dA \cos\theta} \quad (1-15)$$

式中, θ 为所给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 $[\text{W}/(\text{sr} \cdot \text{m}^2)]$ 。

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

$$L_v = \frac{dI_v}{dA \cos \theta} = \frac{d^2 \Phi_v}{d\Omega dA \cos \theta} \quad (1-16)$$

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(1-15)、式(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

$$L_e = M_e / \pi \quad (1-17)$$

$$L_v = M_v / \pi \quad (1-18)$$

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

$$\eta_e = \Phi_e / P \times 100\% \quad (1-19)$$

$$\eta_v = \Phi_v / P \times 100\% \quad (1-20)$$

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

$$\eta_{e, \Delta\lambda} = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \Phi_{e, \lambda} d\lambda}{P} \times 100\% \quad (1-21)$$

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 与接收器有关的辐射度参数及光度参数

从接收器的角度讨论辐射度与光度的参数, 称为与接收器有关的辐射度参数及光度参数。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。与接收器有关的辐射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 $d\Phi$ 。除以该面元的面积 dA 的商, 称为辐照度

e_e , 即

$$e_e = \frac{d\Phi_e}{dA} \quad (1-22)$$

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 (1-22) 可简化为

$$E_e = \Phi_e / A \quad (1-23)$$

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

$$M_{er} = \rho_e(\lambda) E_e(\lambda) \quad (1-24)$$

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

将式 (1-24) 对波长积分, 得到反射体的辐出度

$$M_e = \int \rho_e(\lambda) E_e d\lambda \quad (1-25)$$

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

$$E_v = \frac{\Phi_v}{A} \quad (1-26)$$

E_v 的计量单位是勒(克司)(lx)。

对接收光的反射体, 同样有

$$m_v(\lambda) = \rho_v(\lambda) E_v(\lambda) \quad (1-27)$$

或者

$$M_v(\lambda) = \int \rho_v(\lambda) E_v(\lambda) d\lambda \quad (1-28)$$

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射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射能量有关。

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

$$H_e = \int_0^t E_e dt \quad (1-29)$$

H_e 的计量单位是焦(耳)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 (1-29) 可简化为

$$H_e = E_e t \quad (1-30)$$

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

$$H_v = \int_0^t E_v dt \quad (1-31)$$

H_v 的计量单位是勒秒($\text{lx} \cdot \text{s}$)。

如果面元上的光照度 E_v 与时间无关,则式(1-31)可简化为

$$H_v = E_v t$$

上面讨论的辐射量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射能量的度量,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 所示的辐射度量与光度量的定义。

表 1-1 辐射度量与光度量的定义

辐射度参量				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		$\text{lm} \cdot \text{s}$ [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]
辐亮度	L_e	$L_e = \frac{I_e}{dA \cos\theta}$ $= \frac{d^2\Phi_e}{d\Omega dA \cos\theta}$	$\text{W}/(\text{sr} \cdot \text{m}^2)$ [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	$H_v = \int_0^t E_v dt$	$\text{lx} \cdot \text{s}$ [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

光源发射的辐射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

$$X_{e,\lambda} = \frac{dx_e}{d\lambda} \quad (1-32)$$

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集度,简称为光谱光度量,即

$$X_{v,\lambda} = \frac{dX_v}{d\lambda} \quad (1-33)$$

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

光源的辐射度参量 $X_{e,\lambda}$ 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

$$X_{e,\lambda_r} = X_{e,\lambda} / X_{e,\lambda_{\max}} \quad (1-34)$$

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

$$\Phi_e = \int_0^{\infty} \Phi_{e,\lambda} d\lambda = \Phi_{e,\lambda_{\max}} \int_0^{\infty} \Phi_{e,\lambda_r} d\lambda \quad (1-35)$$

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

$$q_e = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \Phi_{e,\lambda} d\lambda}{\int_0^{\infty} \Phi_{e,\lambda} d\lambda} \quad (1-36)$$

式中, q_e 没有量纲。

1.2.2 量子流速率

光源发射的辐射功率是每秒发射光子能量的总和。光源在给定波长 λ 处,将 $\lambda \sim \lambda + d\lambda$ 范围内发射的辐通量 $d\Phi_e$ 除以该波长 λ 的光子能量 $h\nu$, 就得到光源在 λ 处每秒发射的光子数,称为光谱量子流速率 $dN_{e,\lambda}$, 即

$$dN_{e,\lambda} = \frac{d\Phi_e}{h\nu} = \frac{\Phi_{e,\lambda} d\lambda}{h\nu} \quad (1-37)$$

光源在波长 λ 在 $0 \sim \infty$ 范围内发射的总量子流速率为

$$N_e = \int_0^{\infty} \frac{\Phi_{e,\lambda} d\lambda}{h\nu} = \frac{\Phi_{e,\lambda_{\max}}}{hc} \int_0^{\infty} \Phi_{e,\lambda_r} \lambda d\lambda \quad (1-38)$$

对可见光区域,光源每秒发射的总光子数为

$$N_v = \int_{0.38}^{0.78} \frac{\Phi_{e,\lambda}}{hc} \lambda d\lambda \quad (1-39)$$

量子流速率 N_e 或 N_v 的计量单位为辐射元的光子数每秒(1/s)。