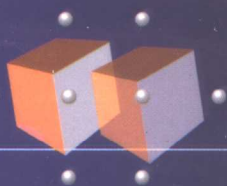


高等学校电子信息科学与工程类专业教材



光电技术

王庆有 主编

蓝天 胡颖 张存林 马宏 王勤 编著



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>

高等学校电子信息科学与工程类专业教材

光电技术

王庆有 主编

蓝天 胡颖 张存林 编著
马宏 王勤

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

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。

本书可作为高等学校光电信息工程、计量测试仪器、测控技术与仪器、测绘工程、环境工程、机械电子工程、公安图像技术、光电检测仪器、光学技术与仪器、生物医学工程等专业的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. —北京:电子工业出版社,2005.4

(高等学校电子信息科学与工程类专业教材)

ISBN 7-121-01043-7

I. 光... II. 王... III. 光电子技术—高等学校—教材 IV. TN2

中国版本图书馆CIP数据核字(2005)第022936号

责任编辑:韩同平

印 刷:北京天竺颖华印刷厂

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

经 销:各地新华书店

开 本:787×980 1/16 印张:23.75 字数:574.6千字

印 次:2005年4月第1次印刷

印 数:5000册 定价:30.00元

凡购买电子工业出版社的图书,如有缺损问题,请向购买书店调换;若书店售缺,请与本社发行部联系。联系电话:(010) 68279077。质量投诉请发邮件至 zhs@phei.com.cn,盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

前 言

光电技术作为信息科学的一个分支,将传统光学技术、现代微电子技术及计算机技术紧密结合,成为获取光信息或借助光提取其他信息的重要手段。它将电子技术的各种基本概念,如调制与解调、放大与振荡、倍频、和频与差频等,移植到光频段,产生光频段的电子技术。这一先进技术使人类能更有效地扩展自身的视觉能力,使视觉的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,并可以在飞秒级记录超快速现象(如核反应、航空器发射)的变化过程。

随着光电技术的迅猛发展,新技术、新器件不断涌现。例如,半导体激光器已得到广泛应用,上百万像素的 CCD 面阵固体摄像器在工业和民用领域已随处可见,热成像技术也已广泛应用于军事和工业领域。可见,光电技术已经渗透到许多科学领域。

本书作者总结了多年的教学经验,为适应当前新技术的发展对高等学校人才培养的需要而编写了本教材。

本教材综合了不同院校的教学特点,适用范围广,在理论方面力求简明易懂,选材方面力求紧跟技术发展动向。为了帮助学生及教师深入掌握教材内容,各章都给出了思考题和习题。

本书共 11 章。第 1 章介绍光电技术基础理论,第 2~5 章分别介绍光电导器件、光生伏特器件、光电发射器件及热辐射探测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 章介绍光电信息变换的基本方式,第 8 章介绍图像信息的光电变换,第 9 章介绍光电信号的数据采集与计算机接口技术,第 10 章介绍光电信息变换技术的典型应用,第 11 章介绍光电技术的新发展。

本书由天津大学王庆有主编并统稿。具体写作分工为:北京理工大学蓝天编写第 5.3、5.4 节及第 7.5 节;首都师范大学胡颖编写第 5.1、5.2 节及第 7.4 节,张存林编写第 11 章;长春理工大学马宏编写第 6 章、第 7.3 节、第 10 章;天津大学王勤编写第 8 章、第 9 章;其余章节由王庆有编写。

需要说明的是,本书第 11 章参考文献较多,为便于读者参阅,将以本章参考文献的形式,放在章末,全书的其他参考文献统一放在书末。

西安工业学院刘缠牢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,天津市耀辉光电技术有限公司的全体员工也给予了很多帮助,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。

编著者

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	(5)
1.2 光谱辐射分布与量子流速率	(7)
1.3 物体热辐射	(8)
1.3.1 黑体辐射定律	(9)
1.3.2 辐射体的分类及其温度表示	(11)
1.4 辐射度参数与光度参数的关系	(15)
1.5 半导体对光的吸收	(20)
1.6 光电效应	(22)
1.6.1 内光电效应	(22)
1.6.2 光电发射效应	(27)
思考题与习题 1	(28)
第 2 章 光电导器件	(30)
2.1 光敏电阻的原理与结构	(30)
2.2 光敏电阻的基本特性	(33)
2.3 光敏电阻的变换电路	(39)
2.4 光敏电阻的应用实例	(43)
思考题与习题 2	(46)
第 3 章 光生伏特器件	(48)
3.1 硅光电二极管	(48)
3.1.1 硅光电二极管的工作原理	(48)
3.1.2 光电二极管的基本特性	(49)
3.2 其他类型的光生伏特器件	(53)
3.2.1 PIN 型光电二极管	(53)
3.2.2 雪崩光电二极管	(53)
3.2.3 硅光电池	(56)
3.2.4 光电三极管	(59)
3.2.5 色敏光生伏特器件	(63)
3.2.6 光生伏特器件组合件	(66)

3.2.7	光电位置敏感器件(PSD)	(70)
3.3	光生伏特器件的偏置电路	(75)
3.3.1	反向偏置电路	(75)
3.3.2	零伏偏置电路	(78)
3.4	半导体光电器件的特性参数与选择	(78)
	思考题与习题 3	(81)
第 4 章	光电发射器件	(84)
4.1	光电发射阴极	(84)
4.1.1	光电发射阴极的主要特性参数	(84)
4.1.2	光电阴极材料	(85)
4.2	真空光电管与光电倍增管的工作原理	(87)
4.2.1	真空光电管的原理	(87)
4.2.2	光电倍增管	(88)
4.3	光电倍增管的基本特性	(90)
4.4	光电倍增管的供电电路	(98)
4.5	光电倍增管的典型应用	(101)
	思考题与习题 4	(104)
第 5 章	热辐射探测器件	(106)
5.1	热辐射的一般规律	(106)
5.2	热敏电阻与热电堆探测器	(108)
5.2.1	热敏电阻	(108)
5.2.2	热电偶探测器	(113)
5.2.3	热电堆探测器	(115)
5.3	热释电器件	(117)
5.3.1	热释电器件的基本工作原理	(118)
5.3.2	热释电器件的灵敏度	(122)
5.3.3	热释电器件的噪声	(123)
5.3.4	热释电器件的类型	(125)
5.3.5	典型热释电器件	(127)
5.4	热探测器概述	(128)
	思考题与习题 5	(129)
第 6 章	发光器件与光电耦合器件	(131)
6.1	发光二极管的基本工作原理与特性	(131)
6.2	发光二极管的应用	(137)
6.3	半导体激光器	(139)
6.3.1	半导体激光器的发光原理	(139)

6.3.2 半导体激光器的结构	(142)
6.4 光电耦合器件	(148)
6.4.1 光电耦合器件的结构与电路符号	(148)
6.4.2 光电耦合器件的特性参数	(150)
6.5 光电耦合器件的应用	(156)
思考题与习题 6	(158)
第 7 章 光电信息变换	(159)
7.1 光电信息变换的分类	(159)
7.1.1 光电信息变换的基本形式	(160)
7.1.2 光电信息变换的类型	(162)
7.2 光电变换电路的分类	(163)
7.2.1 模拟光电变换电路	(163)
7.2.2 模-数光电变换电路	(170)
7.3 几何光学方法的光电信息变换	(174)
7.3.1 长、宽尺寸信息的光电变换	(174)
7.3.2 位移信息的光电变换	(179)
7.3.3 速度信息的光电变换	(181)
7.4 物理光学方法的光电信息变换	(183)
7.4.1 干涉方法的光电信息变换	(184)
7.4.2 衍射方法的光电信息变换	(194)
7.5 时变光电信息的调制	(197)
7.5.1 调制的基本原理与类型	(197)
7.5.2 信号的调制	(203)
7.5.3 调制信号的解调	(207)
思考题与习题 7	(210)
第 8 章 图像信息的光电变换	(212)
8.1 图像传感器简介	(212)
8.2 光电成像原理与电视制式	(213)
8.2.1 光电成像原理	(213)
8.2.2 电视制式	(215)
8.3 真空摄像管	(218)
8.4 电荷耦合器件	(223)
8.4.1 线阵 CCD 图像传感器	(223)
8.4.2 面阵 CCD 图像传感器	(232)
8.5 CMOS 图像传感器	(234)
8.5.1 CMOS 成像器件的结构原理	(235)

8.5.2 典型 CMOS 图像传感器	(238)
8.6 红外热成像	(242)
8.7 图像的增强与变像	(245)
8.7.1 工作原理及其典型结构	(245)
8.7.2 性能参数	(246)
8.7.3 像增强器的级联	(248)
思考题与习题 8	(251)
第 9 章 光电信号的数据采集与计算机接口技术	(253)
9.1 光电信号的二值化处理	(253)
9.1.1 单元光电信号的二值化处理	(253)
9.1.2 序列光电信号的二值化处理	(255)
9.2 光电信号的二值化数据采集与接口	(258)
9.3 光电信号的量化处理与 A/D 数据采集	(260)
9.3.1 单元光电信号的量化处理	(260)
9.3.2 单元光电信号的 A/D 数据采集	(268)
9.3.3 序列光电信号的量化处理	(269)
9.3.4 序列光电信号的 A/D 数据采集与计算机接口	(273)
9.4 视频信号的 A/D 数据采集	(276)
9.4.1 基于 PC 总线的图像采集卡	(276)
9.4.2 基于 PCI 总线的图像采集卡	(280)
思考题与习题 9	(284)
第 10 章 光电信息变换技术的典型应用	(285)
10.1 长度量光电测量	(285)
10.1.1 钢板宽度的非接触自动测量	(285)
10.1.2 板材定长裁剪系统	(287)
10.2 光学传递函数检测技术	(289)
10.3 利用激光准直技术测量物体的直线度与同轴度	(294)
10.4 光电信息变换技术在搜索、跟踪与制导中的应用	(298)
10.4.1 搜索仪与跟踪仪	(298)
10.4.2 激光制导	(300)
10.4.3 红外跟踪制导	(301)
10.5 光学系统透过率测试技术	(304)
10.6 光电信息变换技术在印刷出版工业中的应用	(308)
10.6.1 激光照排系统	(308)
10.6.2 激光雕刻凸版和凹版机	(310)
10.6.3 激光打印机和复印机	(310)

10.6.4 光盘存储·····	(313)
10.7 表面粗糙度的检测方法·····	(316)
10.8 医用真空图像传感器检测技术·····	(319)
10.8.1 X射线图像增强器·····	(319)
10.8.2 医用真空图像传感器的应用·····	(322)
10.9 激光多普勒测速技术·····	(327)
思考题与习题 10·····	(335)
第 11 章 光电技术的新发展 ·····	(336)
11.1 泵浦探测技术·····	(336)
11.2 频率上转换光电探测技术·····	(344)
11.3 光电技术的发展趋势·····	(352)
11.3.1 光电技术的若干进展·····	(352)
11.3.2 光电技术的应用·····	(354)
11.3.3 世界光电子技术发展趋势·····	(363)
思考题与习题 11·····	(364)
本章参考文献·····	(364)
参考文献 ·····	(366)

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了光的折射与反射规律,得出了许多关于光的传播、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}
γ 射线	10^{-13}
	10^{-12}
X 光	10^{-11}
	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^{-3}
厘米波	10^{-2}
无线电波	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(射)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(射)通量和光通量

辐(射)通量或辐(射)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(射)能称为辐(射)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(射)通量对时间的积分称为辐(射)能,而光通量对时间的积分称为光能。

3. 辐(射)出(射)度和光出(射)度

对面积为 A 的有限面光源,表面某点处的面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(射)出(射)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 向半球面空间内发射的总辐通量为

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

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(射)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 $(lm/m^2)]$ 。

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(射)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(射)强度 I_e ,即

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

辐(射)强度的计量单位为瓦(特)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(1-14)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(射)亮度和亮度

光源表面某一点处的面元在给定向上的辐强度,除以该面元在垂直于给定方向平面上的正投影面积,称为辐射亮度 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(特)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(射)效率与发光效率

光源所发射的总辐射通量 Φ_e ,与外界提供给光源的功率 P 之比,称为光源的辐(射)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, $\Phi_{e,\lambda}$ 称为光源辐射通量的光谱密集度, 简称为光谱辐射通量。

1.1.2 与接收器有关的辐射度参数及光度参数

从接收器的角度来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 $d\Phi_e$ 除以该面元的面积 dA 的商, 称为辐照度 e_e , 即

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

e_e 的计量单位是瓦(特)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。虽然两者单相位同, 但定义不一样。辐照度是从物体表面接收辐射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 , 其值称为光照度 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

辐照量与曝光量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常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(克司)秒($lx \cdot s$)。

如果面元上的光照度 E_v 与时间无关, 则式(1-31)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

辐射度量				光度度量			
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(耳)]	光量	Q_v		$lm \cdot s$ [流(明)秒]
辐通量 (辐功率)	Φ_e	$\Phi_e = \frac{dQ_e}{dt}$	W [瓦(特)]	光通量 (光功率)	Φ_v	$\Phi_v = \frac{dQ_v}{dt}$	lm [流(明)]
辐出度	M_e	$M_e = \frac{d\Phi_e}{dA}$	W/m^2 [瓦(特)每平方米]	光出度	M_v	$M_v = \frac{\Phi_v}{A}$	lm/m^2 [流(明)每平方米]

续表

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)
辐强度	I_e	$I_e = \frac{d\Phi_e}{d\Omega}$	W/sr [瓦(特)每球面度]	发光强度	I_v	$I_v = \frac{d\Phi_v}{d\Omega}$	cd [(坎)德拉]
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(特)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)德拉每平方米]
辐照度	E_e	$E_e = \frac{d\Phi_e}{dA}$	W/m^2 [瓦(特)每平方米]	光照度	E_v	$E_v = \frac{d\Phi_v}{dA}$	lx [勒(克司)]
辐照量	H_e	$H_e = \int_0^t E_e dt$	J/m^2 [焦(耳)每平方米]	曝光量	H_v	$H_v = \int_0^t E_v dt$	$\text{lx} \cdot \text{s}$ [勒(克司)秒]

1.2 光谱辐射分布与量子流速率

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, 如光谱辐射通量 $\Phi_{e,\lambda}$ 、光谱辐射出度 $M_{e,\lambda}$ 、光谱辐射强度 $I_{e,\lambda}$ 、光谱辐射亮度 $L_{e,\lambda}$ 、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 $\lambda_1 \sim \lambda_2$ 范围内发射的辐射通量为

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

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

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

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。

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 $\lambda \sim \lambda + d\lambda$ 范围内发射的辐射通量 $d\Phi_e$, 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 从 $0 \sim \infty$ 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)。

1.3 物体热辐射

物体通常以两种不同形式发射辐射能量。

(1) 热辐射。凡高于绝对零度的物体都具有发出辐射的能力, 其光谱辐射量 $X_{e,\lambda}$ 是波长 λ 和温度 T 的函数。温度低的物体发射红外光, 温度升高到 500°C 时开始发射一部分暗红色光, 升高到 1500°C 时开始发白光。物体靠加热保持一定温度使内能不变而持续辐射的辐射形式, 称为物体热辐射或温度辐射。凡能发射连续光谱, 且辐射是温度的函数的物体, 叫做热辐射体, 如一切动植物体、太阳、钨丝白炽灯等均为热辐射体。

(2) 发光。物体不是靠加热保持温度使辐射维持下去, 而是靠外部能量激发的辐射, 称为发光。发光光谱是非连续光谱, 且不是温度的函数。靠外界能量激发发光的方式有电致发光(气体放电产生的辉光)、光致发光(日光灯内 Hg 蒸气发射的紫外光激发管壁上的荧光物质发