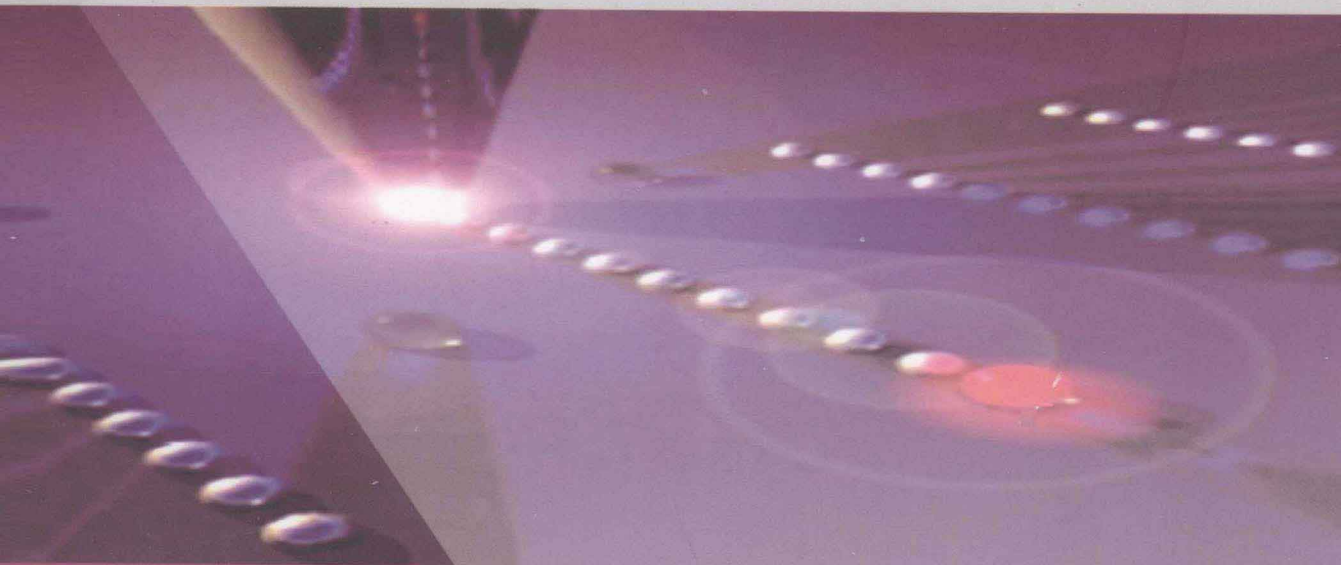


高等学校教材

光电子技术

第二版

张永林 狄红卫 编著



高等学校教材

光电子技术

Guangdianzi Jishu

第二版

张永林 狄红卫 编著



高等教育出版社·北京
HIGHER EDUCATION PRESS BEIJING

内容简介

本教材介绍光电子技术的理论和应用基础,介绍光电子系统中关键器件的原理、结构、应用技术和新的发展。第1章介绍光电系统的常用光源、半导体激光器、光纤激光器和发光二极管。第2章介绍光调制技术和典型的光调制器。第3章介绍光电转换的理论基础、重要的光探测器及其应用技术。第4章介绍 CCD、CMOS 图像传感器和图像增强器等光电成像器件。第5章介绍光存储器及新技术。第6章介绍 LCD、LED、OLED、PDP、DMD、LCOS 等当前最引人注目的平板显示器件。进入 21 世纪,光电子技术飞速发展,在人类生产和生活中展现辉煌。在第一版前 6 章的基础上,第二版加入了新的内容,并增加了第 7、8 两章。第 7 章介绍光电子技术在信息、能源、公安国防、生物医学等领域中的应用。第 8 章介绍发展中的纳米光电子材料与器件、近场光学、光子晶体及应用。

本教材适用于高等学校本科光电信息科学与工程、电子科学与技术、电子信息工程、应用物理学等专业,也可供其他相关专业师生和科技人员参考。本书取材新颖,内容丰富,深入浅出,应用性强,可作为本科及以上层次的光电子技术课程的教材或参考书。

图书在版编目(CIP)数据

光电子技术 / 张永林, 狄红卫编著. -- 2 版. -- 北京: 高等教育出版社, 2012. 12

ISBN 978-7-04-036482-8

I. ①光… II. ①张… ②狄… III. ①光电子技术-高等学校-教材 IV. ①TN2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 276890 号

策划编辑 吴陈滨 责任编辑 吴陈滨 封面设计 于 涛 版式设计 王艳红
插图绘制 尹 莉 责任校对 杨凤玲 责任印制 毛斯璐

出版发行	高等教育出版社	网 址	http://www.hep.edu.cn
社 址	北京市西城区德外大街 4 号		http://www.hep.com.cn
邮政编码	100120	网上订购	http://www.landaco.com
印 刷	国防工业出版社印刷厂		http://www.landaco.com.cn
开 本	787mm × 1092mm 1/16	版 次	2005 年 5 月第 1 版
印 张	16.75		2012 年 12 月第 2 版
字 数	380 千字	印 次	2012 年 12 月第 1 次印刷
购书热线	010-58581118	定 价	26.50 元
咨询电话	400-810-0598		

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换
版权所有 侵权必究
物料号 36482-00

第二版前言

光电子技术是电子学技术、光子学技术互相渗透、优势结合而产生的,在现代科技、经济、军事、文化、医学各个领域发挥着极其重要的作用。以此为支撑的光电子产业是世界上争相发展的支柱产业,是竞争激烈、发展迅速的高科技企业的主力军。

光电子科学、技术和产业的发展,最关键的是培养人才。本书对第一版的6章内容进行了精心修订,比较全面地介绍了光电子技术与系统的光源、光调制、光探测、光存储、光显示的器件原理、结构和应用技术;增加了很多新的内容,如:微腔激光器、光纤激光器、超高亮度LED、蓝光光盘等,以及一系列先进技术,较好地展示了21世纪光电子技术的飞速发展。

本书在第一版的基础上新增第7章——光电子技术在现代社会中的应用,特别选择对人类社会有重大影响的信息、能源、公安国防、生物医学等领域,介绍光电子技术的重要作用。本章内容可使学生在掌握前6章知识点的基础上大大扩充知识面,加深对光电子技术重要性的认识,增强学习兴趣;也使教师更好地使用教材、有展开发挥的空间。

新增的第8章介绍了发展中的纳米光电子材料与器件、近场光学、光子晶体,反映光电子科学与技术的发展前沿。对于学生了解学科发展方向,参与科研实践,准备进入研究生学习阶段,都是很有益的。

本书由暨南大学张永林、狄红卫合作编写。其中,第1、2、6、7、8章由张永林编写,第3、4、5章由狄红卫编写,张永林负责统稿。

广东光学界著名专家王天及先生审阅了全稿,提出了宝贵的意见和建议,使编者深受启迪,获益匪浅。本教材在编写过程中,参考了国内外近年出版的专著、文献和教材。在此,特向前辈和同行们一并表示衷心的感谢。

因编者水平有限,错误之处,恳请读者指正。编者邮箱为:tzhayl@jnu.edu.cn。

编者
2012年6月

第一版前言

20世纪,电子学及微电子技术、计算机技术飞速发展并取得了令人瞩目的成就,因此,人们称20世纪是电子学世纪。然而,20世纪60年代,激光器的出现带来了划时代的变革。经过半个世纪的发展,现代光学技术能够产生巨大能量和信息容量,具有高速、并行传输与处理的能力,可以非接触、高精度地检测。已经有许多非凡的成果推动了社会生活,向人们展示:21世纪已步入光子与电子交相辉映的全新时代。

光电子技术正是由电子技术和光子技术互相渗透、优势结合而产生的,包括光电子信息技术和光电子能量科学技术。光电子技术在现代科技、经济、军事、文化、医学等领域发挥着极其重要的作用,以此为支撑的光电子产业是世界上争相发展的支柱产业,是竞争激烈、发展最快的高科技产业的主力军。

光电子科学、技术和产业的发展最关键的是人才。本教材力求比较全面地介绍光电子技术的理论和应用基础,介绍光电子系统中关键器件的原理、结构、应用技术和新的发展。本书在阐明基本原理的同时,还突出了应用技术,使学生能够把握光电子技术的总体框架,有兴趣、有信心投入实践和创新活动。

全书共分六章,分别介绍光源、光调制器、光探测器、光电成像器件、光存储器和平板显示器件。第1章光源部分突出半导体激光器、固体激光器,介绍超高亮度的发光二极管。第2章光调制突出横向电光调制,过渡到介绍光波导调制器。第3章光探测器注意介绍集成光电器件、NEA型光电阴极。第4章光电成像器件突出CCD及其驱动器设计、CMOS图像传感器。第5章光存储器介绍光盘存储的原理、各种光盘和光驱以及光存储技术的新发展。第6章介绍LCD、OLED、PDP、DMD等当前最引人注目的平板显示器件。将光电子技术的理论和应用技术展现在每一章中,使学生在学好关键器件的同时,掌握光电子技术;通过各章之间的有机联系,学习建立各种光电系统的能力。

本书由暨南大学张永林、狄红卫合作编写,其中,第1、2、6章由张永林编写,第3、4、5章由狄红卫编写,张永林负责统稿。

华南理工大学周佐平先生审阅了全稿,提出了许多宝贵的意见,使编者获益匪浅。本教材编写过程中,参考了国内外近年出版的专著、文献和教材。在此,特向前辈和同行们一并表示衷心的感谢。

因编者水平有限,错误之处,恳请读者指正。

编者

2004年9月

目 录

第 1 章 光源	1	3.1.4 光探测器的性能参数	69
1.1 辐射度学与光度学的基础知识	2	3.2 光热探测器	72
1.2 热辐射光源	7	3.2.1 热敏电阻	72
1.3 气体放电光源	9	3.2.2 热释电探测器	72
1.4 激光器	12	3.3 光电探测器	75
1.4.1 激光器概述	12	3.3.1 光电导器件	75
1.4.2 固体激光器	13	3.3.2 结型光电器件	85
1.4.3 半导体激光器	16	3.3.2.1 基本原理	85
1.4.4 光纤激光器	27	3.3.2.2 光电池	86
1.5 发光二极管(LED)	31	3.3.2.3 光电二极管	92
1.5.1 普通亮度的 LED	31	3.3.2.4 光电三极管	102
1.5.2 超高亮度的 LED	33	3.3.2.5 光电场效应管	107
1.5.3 白光 LED	35	3.3.2.6 组合式光电探测器	108
练习与思考题	37	3.3.3 光电发射器件	113
第 2 章 光辐射的调制	38	3.3.3.1 光电管	113
2.1 机械调制	38	3.3.3.2 光电倍增管	114
2.2 电光调制	40	3.4 集成光电子器件	122
2.3 声光调制	47	3.5 微光机电系统	123
2.4 磁光调制	51	练习与思考题	124
2.5 电吸收光调制	53	第 4 章 光电成像器件	127
练习与思考题	54	4.1 摄像管	127
第 3 章 光探测器	55	4.2 摄像器件的性能参数	129
3.1 光探测器的理论基础	55	4.3 电荷耦合器件 CCD	131
3.1.1 光热效应	55	4.4 CMOS 图像传感器	142
3.1.2 光电效应	56	4.5 图像增强器	146
3.1.2.1 半导体中的载流子	57	练习与思考题	151
3.1.2.2 光电导效应	60	第 5 章 光存储器	153
3.1.2.3 光伏效应	63	5.1 光存储器概述	153
3.1.2.4 光电发射效应	66	5.2 光盘存储器的工作原理	156
3.1.3 光探测器的噪声	68		

5.3 CD、DVD、蓝光光盘、可擦重写型 光盘	161	7.3 光电子技术应用于公安国防	200
5.4 超高密度光存储技术	166	7.3.1 应用于公安工作	200
练习与思考题	169	7.3.2 应用于军事技术	203
第6章 平板显示器件	170	7.4 光电子技术支撑着生物医学	208
6.1 液晶显示器(LCD)	170	7.4.1 激光医疗	209
6.2 LED、OLED 显示器	175	7.4.2 生物医学中典型的光电仪器	212
6.3 等离子体显示器(PDP)	176	第8章 发展中的纳米光电子技术	227
6.4 DLP 投影显示(DMD)	178	8.1 纳米光电子材料	227
6.5 硅基液晶显示器(LCOS)	180	8.2 纳米光电子器件	231
练习与思考题	181	8.3 近场光学	237
第7章 光电子技术在现代社会中 的应用	182	8.4 光子晶体	241
7.1 光电子技术与信息社会	182	8.4.1 光子晶体的基本概念	241
7.2 光电子技术与新能源、光加工	189	8.4.2 光子晶体的主要应用	244
7.2.1 太阳能利用	189	8.4.3 光子晶体光纤	247
7.2.2 惯性约束核聚变	192	8.4.4 光子晶体的负折射效应	252
7.2.3 激光加工	193	参考文献	258

第 1 章 光 源

一切能产生光辐射的辐射源都称为光源。天然光源是自然界中存在的发光体,如太阳。人造光源是人为将各种形式的能量(电能、热能、化学能)转化成光辐射的器件。光是电磁波,图 1.1 所示为电磁波谱,可看到光辐射的波段范围及与射线区(X 射线以下)、长波区(微波、无线电波以上)的关系。

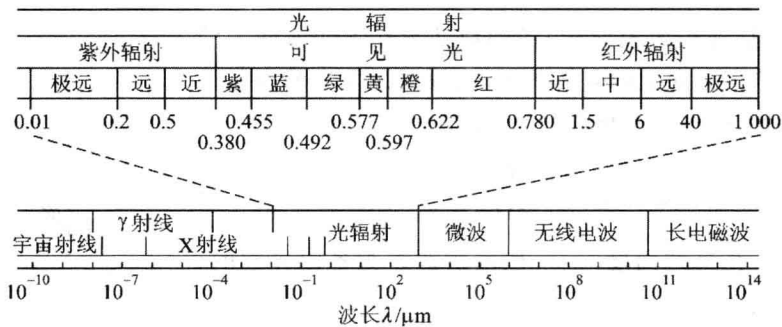
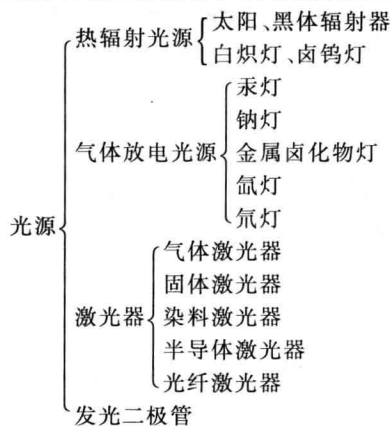


图 1.1 电磁波谱

在光电系统中,光源是必不可少的。其光谱分布从几十微米的远红外光直到 X、 β 、 γ 射线,其中,常用的是工作在可见光区、红外光区的光源。按照发光机理,光源可以分成如下几类:



本章将简要叙述它们的发光机理,介绍它们的重要特性和应用,以帮助读者在设计光电系统时正确选用光源。

为了衡量光源和光电探测器的性能,需要对光辐射进行定量描述。因此,本章首先介绍辐射度学与光度学的一些基础知识。

1.1 辐射度学与光度学的基础知识

一、辐射度的基本物理量

辐射度量是用物理学中对电磁辐射测量的方法来描述光辐射的一套参量,主要有:

1. 辐射能 Q 。

以辐射的形式发射、传播或接收的能量,单位为 J(焦耳)。

2. 辐射通量 Φ 。

单位时间内通过某截面的所有波长的总电磁辐射能,又称辐射功率,单位为 W(瓦、焦耳每秒)。

3. 辐射强度 $I_e(\theta, \varphi)$

描述点辐射源(或辐射源面元)的辐射功率在不同方向上的分布。定义为在给定向向上的立体角元内,辐射源发出的辐射通量与立体角元之比,如图 1.2 和式(1.1)所示。

$$I_e(\theta, \varphi) = \frac{d\Phi_e}{d\Omega} \tag{1.1}$$

I_e 的单位为 W/sr(瓦每球面度)。一般辐射源多为各向异性的,即 I_e 随 (θ, φ) 而改变。

4. 辐射出射度 M_e 与辐射亮度 B_e 。

这是描述面辐射源上各面元辐射能力的物理量。图 1.3(a)、(b)分别表示 M_e 、 B_e 的定义。

辐射出射度 M_e 被定义为通过单位面元辐射出的功率,即 $d\Phi_e$ 与 dS 之比,即

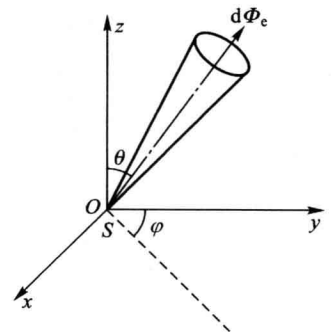


图 1.2 点辐射源的辐射强度

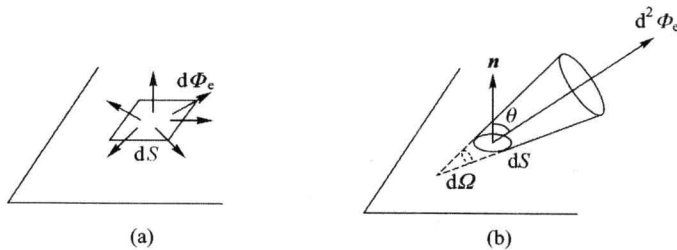


图 1.3 M_e 、 B_e 的定义

(a) M_e 的定义; (b) B_e 的定义

$$M_e = \frac{d\Phi_e}{dS} \quad (1.2)$$

单位为 W/m^2 (瓦每平方米)。 M_e 是面元位置的函数, 面辐射源上不同点可有不同的 M_e 值。此外, 还需要知道面辐射源沿不同方向的辐射能力的差异, 这就要用辐射亮度 B_e 来描述。 B_e 是面元位置和辐射方向 (θ, φ) 的函数, 等于该方向面元辐射强度与面元表观面积之比, 即

$$B_e(\theta, \varphi) = \frac{d^2\Phi_e}{dS \cos \theta d\Omega} = \frac{dI_e(\theta, \varphi)}{dS \cos \theta} \quad (1.3)$$

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

5. 辐射照度 L_e

L_e 是辐射接收面上单位面积承受的辐射通量, 即

$$L_e = \frac{d\Phi_e}{dS} \quad (1.4)$$

单位为 W/m^2 (瓦每平方米)。式(1.4)中, dS 为接收面上的面元, $d\Phi_e$ 是照射到该面元的辐射通量的总和。 L_e 是面元的位置函数。

6. 光谱辐射量

辐射源所发射的能量往往由很多波长的单色辐射所组成。为了研究光源对各种波长的辐射, 提出光谱辐射量的概念。

光谱辐射量是该辐射量在波长 λ 处的单位波长间隔内的大小, 又叫辐射量的光谱密度, 是辐射量随波长的变化率。

综上所述, 有

$$\text{光谱辐射通量 } \Phi_e(\lambda): \quad \Phi_e(\lambda) = \frac{d\Phi_e}{d\lambda} \quad (1.5)$$

$$\text{光谱辐射强度 } I_e(\lambda): \quad I_e(\lambda) = \frac{dI_e}{d\lambda} \quad (1.6)$$

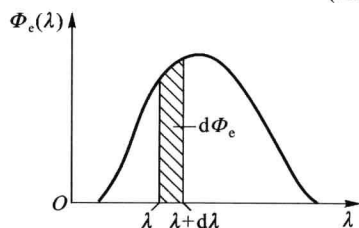
$$\text{光谱辐射出射度 } M_e(\lambda): \quad M_e(\lambda) = \frac{dM_e}{d\lambda} \quad (1.7)$$

$$\text{光谱辐射亮度 } B_e(\lambda): \quad B_e(\lambda) = \frac{dB_e}{d\lambda} \quad (1.8)$$

$$\text{光谱辐射照度 } L_e(\lambda): \quad L_e(\lambda) = \frac{dL_e}{d\lambda} \quad (1.9)$$

由图 1.4 可见, 辐射源的总辐射通量 Φ_e 为

$$\Phi_e = \int_0^{\infty} \Phi_e(\lambda) d\lambda \quad (1.10)$$



其他辐射度量也有类似的关系。用 X_e 代表其他辐射度量 图 1.4 光谱辐射通量与波长的关系

(M_e 、 B_e 、 L_e 等), 则

$$X_e = \int_0^{\infty} X_e(\lambda) d\lambda \quad (1.11)$$

二、光度的基本物理量

1. 光谱光视效率

人眼只能感知波长在 $0.38 \sim 0.78 \mu\text{m}$ 之间的辐射, 故称这个波段的光为可见光。在可见光范围内, 人眼对不同波长的感光灵敏度也不同: 对绿光最灵敏, 对红光、蓝光的灵敏度较低。此外, 受视觉生理和心理作用的影响, 不同的人对各种波长的感光灵敏度也是不同的。

国际照明委员会(CIE)根据对许多人的大量观察结果, 确定了人眼对各种光波长的相对灵敏度, 称为光谱光视效率或视见函数, 如图 1.5 所示。

2. 光度量

辐射度量是客观物理量。但是, 波长不同而量值相同的辐射度量引起人眼的视觉是不同的, 这种差异是辐射度量无法描述的。光度学则是以人的视觉为基础, 对光辐射进行测量的科学。光度量的基本物理量与辐射度量是一一对应的, 都是定量地描述光辐射, 但光度量体现了人眼的视觉特性。

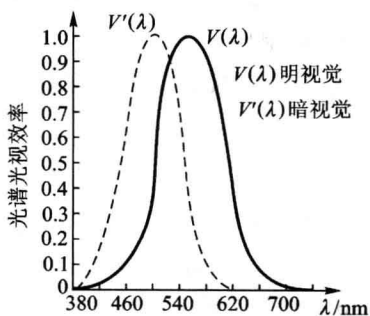


图 1.5 光谱光视效率曲线

(1) 光能 Q_v

按人眼的感觉强度进行度量的辐射能大小称为光能, 它与辐射能的大小、人眼的视觉灵敏度成正比。

(2) 光通量 Φ_v

单位时间内通过某截面的所有光波长的光能称为光通量, 单位为 lm (流明)。

(3) 发光强度 I_v

$$I_v = \frac{d\Phi_v}{d\Omega} \quad (1.12)$$

单位为 cd (坎德拉), $1 \text{ cd} = 1 \text{ lm/sr}$ 。发光强度 I_v 是光度量中最基本的单位。规定: 频率为 $540 \times 10^{12} \text{ Hz}$ (对应于空气中的 555 nm 波长) 的单色辐射光在给定方向上的辐射强度为 $\frac{1}{683} \text{ W/sr}$ 时, 该方向上的发光强度为 1 cd , 即 $\lambda = 555 \text{ nm}$ 时, 有

$$I_v = 1 \text{ cd} = \frac{1 \text{ lm}}{\text{sr}} = \frac{1}{683} \text{ W/sr} \quad (1.13)$$

由式(1.13)可得: $1 \text{ W} = 683 \text{ lm}$ 。

555 nm 是明视觉 $V(\lambda)$ 曲线中人眼最敏感的波长, 即 $V(555 \text{ nm}) = 1$ 。其他波长处, $V(\lambda) < 1$, $1 \text{ W} < 683 \text{ lm}$, $1 \text{ W} = 683V(\lambda) \text{ lm}$ 。定义

$$K_m = 683 \text{ lm/W} \quad (1.14)$$

为明视觉最大光谱光视效能。这样就可建立同一波长下,辐射通量与光通量之间的换算关系,即

$$\Phi_v(\lambda) = K_m V(\lambda) \Phi_e(\lambda) \quad (1.15)$$

对含有多种波长的辐射通量 Φ_e ,它对应的光通量 Φ_v 为

$$\Phi_v = K_m \int_0^{\infty} V(\lambda) \Phi_e(\lambda) d\lambda \quad (1.16)$$

由此可见,从光度学中最基本的单位——cd 出发,可确定光通量的单位 lm、光能量的单位 $\text{lm} \cdot \text{s}$ 以及下文中 M_v 、 B_v 、 L_v 的单位。

(4) 光出射度 M_v 和光亮度 B_v

$$M_v = \frac{d\Phi_v}{dS} \quad (1.17)$$

单位为 lm/m^2 。

$$B_v = \frac{d^2\Phi_v}{dS \cos \theta d\Omega} = \frac{dI_v}{dS \cos \theta} \quad (1.18)$$

单位为 cd/m^2 。实用单位为 sb(熙提), $1 \text{ sb} = 10^4 \text{ cd/m}^2$ 。

(5) 光照度 L_v

$$L_v = \frac{d\Phi_v}{dS} \quad (1.19)$$

单位为 lx(勒克斯), $1 \text{ lx} = 1 \text{ lm/m}^2$ 。

若用 X_v 代表任一光度量, X_e 代表对应的辐射度量,则有普适关系式

$$X_v = K_m \int_0^{\infty} V(\lambda) X_e(\lambda) d\lambda \quad (1.20)$$

表 1.1 给出了各波长对应的光谱光视效率,表 1.2 为辐射度量和光度量的对照表。

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	450	0.038	0.455
390	0.000 12	0.002 209	460	0.060	0.567
400	0.000 4	0.009 29	470	0.091	0.676
410	0.001 2	0.034 84	480	0.139	0.793
420	0.004 0	0.096 6	490	0.208	0.904
430	0.011 6	0.199 8	500	0.323	0.982
440	0.023	0.328 1	510	0.503	0.997

续表

波长 /nm	明视觉 $V(\lambda)$	暗视觉 $V'(\lambda)$	波长 /nm	明视觉 $V(\lambda)$	暗视觉 $V'(\lambda)$
520	0.710	0.935	660	0.061	0.000 319 2
530	0.862	0.811	670	0.032	0.000 148 0
540	0.954	0.650	680	0.017	0.000 071 5
550	0.995	0.481	690	0.008 2	0.000 035 33
560	0.995	0.328 8	700	0.004 1	0.000 017 80
570	0.952	0.207 6	710	0.002 1	0.000 009 14
580	0.870	0.121 2	720	0.001 05	0.000 004 78
590	0.757	0.065 5	730	0.000 52	0.000 002 546
600	0.631	0.033 15	740	0.000 25	0.000 001 379
610	0.503	0.015 93	750	0.000 12	0.000 000 760
620	0.381	0.007 37	760	0.000 06	0.000 000 425
630	0.265	0.003 335	770	0.000 03	0.000 000 261 3
640	0.175	0.001 497	780	0.000 015	0.000 000 139 0
650	0.107	0.000 677			

表 1.2 辐射度量和光度量的对照表

辐射度量	符号	单位	光度量	符号	单位
辐(射)能	Q_e	J	光能	Q_v	lm · s
辐(射)通量或 辐(射)功率	Φ_e	W	光通量	Φ_v	lm
辐(射)照度	L_e	W/m ²	(光)照度	L_v	lx = lm/m ²
辐(射)出射度	M_e	W/m ²	(光)出射度	M_v	lm/m ²
辐(射)强度	I_e	W/sr	发光强度	I_v	cd = lm/sr
辐(射)亮度	B_e	W/(m ² · sr)	(光)亮度	B_v	cd/m ²

三、光源的辐射效率与发光效率

常用光源大都是电光源(电能转化成光辐射能)。

在所需的波长范围($\lambda_1 \sim \lambda_2$)内,光源发出的辐射通量与所需电功率之比称为该光源在规定光谱范围内的辐射效率,即

$$\eta_e = \frac{\Phi_e}{P} = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \Phi_e(\lambda) d\lambda}{P} \quad (1.21)$$

发光效率是指光源发射的光通量与所需的电功率之比,即

$$\eta_v = \frac{\Phi_v}{P} = \frac{K_m \int_0^{\infty} \Phi_e(\lambda) V(\lambda) d\lambda}{P} \quad (1.22)$$

单位为 lm/W(流明每瓦)。

根据工作的要求选择效率高的光源。表 1.3 给出了常见光源的发光效率。

表 1.3 常用光源的发光效率

光源种类	发光效率/(lm/W)	光源种类	发光效率/(lm/W)
普通钨丝灯	8 ~ 18	高压汞灯	30 ~ 40
卤钨灯	14 ~ 30	高压钠灯	90 ~ 100
普通荧光灯	35 ~ 60	球形氙灯	30 ~ 40
三基色荧光灯	55 ~ 90	金属卤化物灯	60 ~ 80

1.2 热辐射光源

凡具有温度的物体都能产生热辐射,辐射能是由原子、分子的热运动能量转变而来的。为了维持辐射,需由外界提供能量。热辐射光源是使发光物体升温到足够高而发光的光源,这类光源在辐射过程中不改变自身的原子、分子的内部状态,辐射光谱是连续光谱。

绝对黑体是一种理想热辐射源。所谓绝对黑体(以下简称黑体)是具有以下典型特征的物体:对任何波长的入射辐射,它的光谱吸收比 $\alpha(\lambda) = 1$,透射比 $t(\lambda) = 0$,反射比 $r(\lambda) = 0$ 。在热平衡条件下,有关系式

$$M_{eb}(\lambda, T) = \alpha(\lambda, T)L_{eb}(\lambda, T) \quad (1.23)$$

式中, $M_{eb}(\lambda, T)$ 为黑体的辐射出射度, $L_{eb}(\lambda, T)$ 为其入射辐射。可见,对于黑体: $\alpha(\lambda, T) = 1$, $M_{eb}(\lambda, T) \approx L_{eb}(\lambda, T)$; 对于其他物体: $\alpha(\lambda, T) < 1$, $M_e(\lambda, T) < L_e(\lambda, T)$ 。

强吸收体必是强辐射体,因此,黑体有最强的热辐射能力。

普朗克根据光的量子理论,推导出描述黑体光谱辐射出射度 $M_{eb}(\lambda, T)$ 与波长、热力学温度之间关系的著名公式,即

$$M_{eb}(\lambda, T) = \frac{c_1}{\lambda^5 (e^{c_2/\lambda T} - 1)} \quad (c_1 = 2\pi hc^2, c_2 = hc/k) \quad (1.24)$$

式中, c 为真空中的光速, h 和 k 分别为普朗克常数和玻耳兹曼常数。对式(1.24)取波长 λ 的导数等于零,可得

$$\lambda_m = \frac{hc}{5kT} \quad (1.25)$$

这就是维恩位移定律。将式(1.24)对所有波长积分,可得

$$M_{eb}(T) = \int_0^{\infty} M_{eb}(\lambda, T) d\lambda = \sigma T^4 \quad (1.26)$$

这就是斯蒂芬-玻耳兹曼定律。

图 1.6 给出了黑体的光谱辐射出射度与波长和温度的关系,反映了上述两个重要定律。可见,随着温度的升高,曲线下的面积——黑体的总辐射度 $M_{eb}(T)$ 迅速增加,峰值波长 λ_m 向短波方向移动。

太阳和黑体辐射器(也称黑体模拟器)非常近似于黑体,也称为全辐射体。其他热辐射光源的 $\alpha(\lambda, T) < 1$,称为灰体,它们的辐射能力具有与黑体类似的规律。

色温与相关色温的概念。黑体的温度决定了它的辐射光谱分布。以黑体作为标准光源,其他热辐射光源发射光的颜色如果与黑体在某一温度下的辐射光的颜色相同,则黑体的这一温度称为该热辐射光源的色温;如果热辐射光源发光的颜色与任何温度下的黑体辐射的颜色都不相同,就以与发光颜色最相近的黑体温度为它的相关色温。

一、太阳与黑体辐射器

太阳可看成是一个直径为 1.392×10^9 m 的光球,它到地球的年平均距离是 1.496×10^{11} m。因此,从地球上观看太阳时,太阳的张角只有 0.533° 。图 1.7 所示为太阳的光谱能量分布曲线。可见大气层外的太阳光谱能量分布相当于 5 900 K 左右的黑体辐射,辐射波长峰值恰是人眼最敏感波长 $0.55 \mu\text{m}$ 。

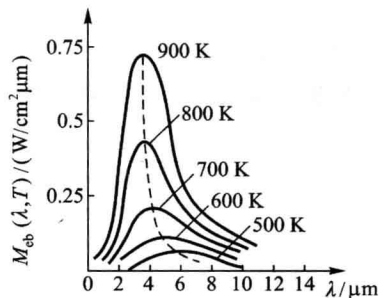


图 1.6 黑体光谱辐射出射度与波长和温度的关系

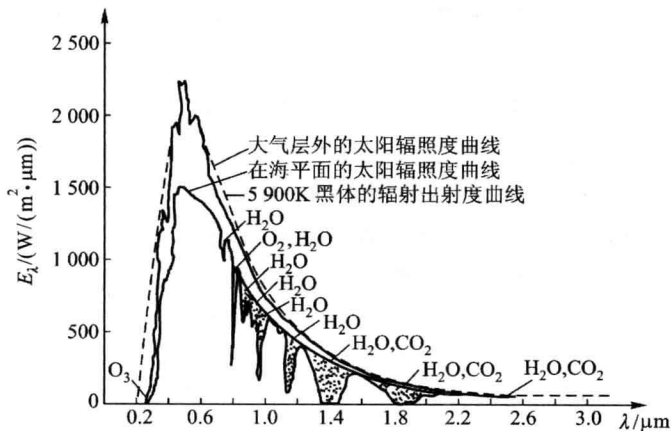


图 1.7 太阳的光谱能量分布曲线

射到地球上的太阳辐射,要斜穿过一层厚厚的大气层,大气层使太阳辐射在光谱和空间分布、能量大小、偏振状态等都发生了变化。大气中氧(O_2)、水汽(H_2O)、臭氧(O_3)、二氧化碳(CO_2)、一氧化碳(CO)和其他碳氢化合物(CH_4 等)都对太阳辐射有选择地吸收,主要是红外区。可见光区也受到大气衰减,但呈现白光,见图1.7中海平面的太阳辐照度曲线。

黑体辐射器是科学设计制作的小孔空腔结构的辐射器,有绝热层、测温和控温的传感器,可保持热平衡和调节温度,可以很好地实现辐射功能,所以也称作黑体模拟器。它常用作标准光源,有多种规格。一般最高工作温度是3 000 K,实际应用大多在2 000 K以下。辐射的峰值波长在红外区。

二、白炽灯与卤钨灯

白炽灯用钨丝做灯丝,玻璃泡壳,是用得最普遍的光源。电流通过钨丝,使钨丝升温而发光。受灯丝工作温度所限,白炽灯的色温约2 800 K。辐射光谱限于透过玻璃泡的部分,约0.4 ~ 3 μm ;可见光只占6% ~ 12%,当加上红外滤光片时,可作为近红外光源。仪器中使用的白炽灯是低电压大电流的,即电压6 ~ 12 V,功率在数瓦到几十瓦,灯丝聚集成点光源状。

白炽灯价廉,但寿命短,一般只有几百小时。工作时间长了,灯丝的钨蒸发,沉积在泡壳上。使灯泡发黑,亮度降低,灯丝易烧断。

为了克服白炽灯的弱点,产生了卤钨灯。卤钨灯与白炽灯的区别在于:用更耐高温的石英为泡壳,在泡壳内充入微量卤族元素或其化合物(常用溴或碘的化合物,如溴化硼)。灯点燃后,高温下卤族元素的化合物释放出溴或碘蒸气,灯丝蒸发出的钨分子在温度较低的泡壳附近与溴或碘化合,形成的卤化钨在灯泡内扩散。当扩散到高温灯丝附近,又分解,使钨分子又有很高的概率重新粘在灯丝上。这个卤钨循环的过程使灯丝不会因蒸发而迅速变细,灯的寿命较长。卤钨灯的工作温度比白炽灯的高,色温达3 200 K以上,辐射光谱为0.25 ~ 3.5 μm 。发光效率可达30 lm/W,比白炽灯高2 ~ 3倍,更广泛地用作仪器的白光源。

1.3 气体放电光源

气体放电光源的种类很多,各种灯的基本结构相似:用玻璃或石英等材料做成管形的、球形的灯泡,泡壳内有电极。直流灯的电极分阴极、阳极,交流灯不分。泡壳内充入发光用的气体,如氢、氦、氖、氙、氩,或金属蒸气,如汞、镉、铟、铊、铷,或金属化合物蒸气,如金属卤化物蒸气等。

气体在电场作用下激励出电子和离子,成为导体。离子向阴极、电子向阳极运动,从电场中得到能量,它们与气体原子或分子碰撞时会激励出新的电子和离子,也会使气体原子受激,内层电子跃迁到高能级。受激电子返回基态时,就辐射出光子来。这样的发光机制就称为气体放电。

气体放电光源的特点:

- ① 效率高。比同瓦数的白炽灯发光效率高2 ~ 10倍,节能。
- ② 结构紧凑。不是靠灯丝发光,电极牢固紧凑,耐震,抗冲击。
- ③ 寿命长。一般比白炽灯寿命长2 ~ 10倍。

④ 辐射光谱可以选择,只要选择适当的发光材料即可。

由于上述特点,气体放电光源在光电测量和照明工程中得到了广泛的应用。这里就常用的几种做简要介绍。

一、汞灯

汞灯按照管内充的汞蒸气气压的不同分为低压汞灯、高压汞灯、超高压汞灯。汞的气压越高,汞灯的发光效率也越高,发射的光也由线状光谱向带状光谱过度,如图 1.8 所示。

1. 低压汞灯

主要辐射 253.7 nm 的紫外光,用作紫外光源。当在其管壳外再加一个管壳,壳内壁涂以合适的荧光粉时,253.7 nm 紫外光激发荧光粉发出可见光,这就是荧光灯。照明用的日光灯就是荧光灯中的一种。

2. 高压汞灯

汞蒸气气压为 $(1 \sim 10) \times 10^5$ Pa。由于气体密度大,除了受激原子的辐射发光,还有电子与离子的复合发光,激发原子与正常原子的碰撞发光;因而,可见区的辐射明显加强,呈带状光谱,红外区出现弱的连续光谱。在高压汞灯外再加一个荧光壳,就成为高效照明光源。

3. 球形超高压汞灯

汞蒸气气压为 1 ~ 20 MPa,电子与离子复合发光、激发原子与正常原子碰撞发光更加强烈。光谱线较宽,形成连续背景,可见区偏蓝,红外辐射增强。球形超高压汞灯中,两电极相距在毫米量级,如图 1.9 所示。球形超高压汞灯亮度高,是很好的点光源。

二、钠灯

钠灯与汞灯的原理相似,不过放电管中充的是氖、氩混合气体与金属钠滴。通电后,先是氖气放电发出红光,放电发热使钠滴蒸发成钠蒸气,逐渐代替氖气放电而辐射出强烈的橙黄色光。为使管内有一定的钠蒸气压,管壁要维持 250 ~ 300 °C 的温度。因此,放电管外还要有一个外壳作为保温罩,两层之间抽成真空保温。

低压钠灯发出波长为 589 nm、589.6 nm 的两条谱线,单色性较好,常用作单色光源。高压钠灯的光接近白色,亮度高,紫外辐射少,常用于照明。

三、金属卤化物灯

汞灯有比较高的发光效率,但缺少红色。人们曾努力试图加入经气体放电能产生红光的金属,但未成功。原因是大多数金属蒸气气压很低,不能产生有效的辐射,有的金属蒸气对石英泡壳有腐蚀作用。卤钨灯的成功启发人们考虑到金属卤化物的蒸气气压高、对石英玻璃无腐蚀作

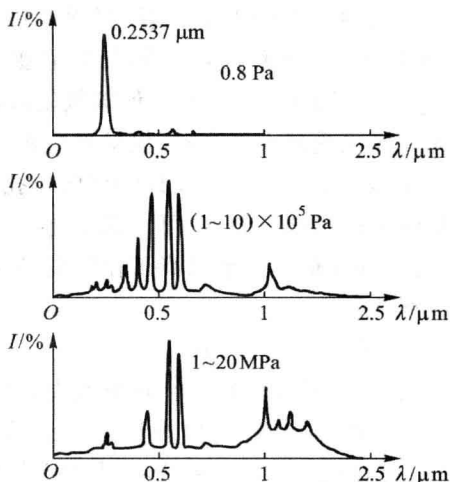


图 1.8 不同汞蒸气气压下光谱能量的分布

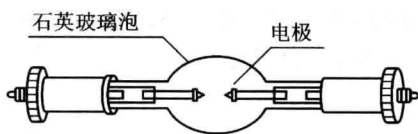


图 1.9 球形超高压汞灯