

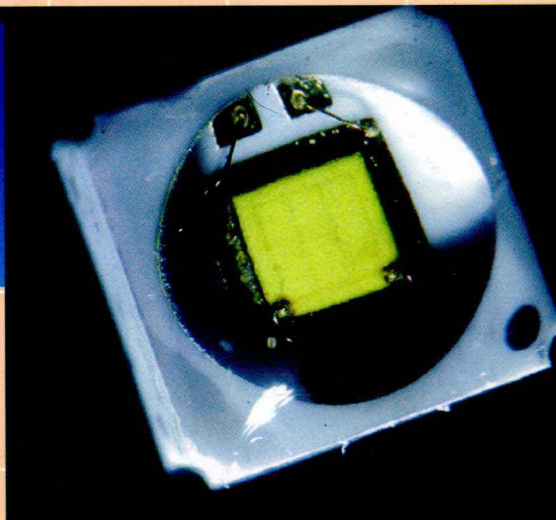
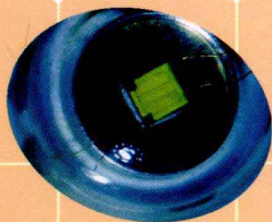
四川省2011年度重点图书项目

太阳能光伏与照明应用技术系列教材

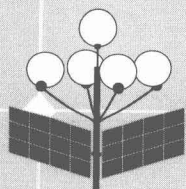
半导体 照明导论

bandaoti zhaoming daolun

饶海波 主 编



电子科技大学出版社



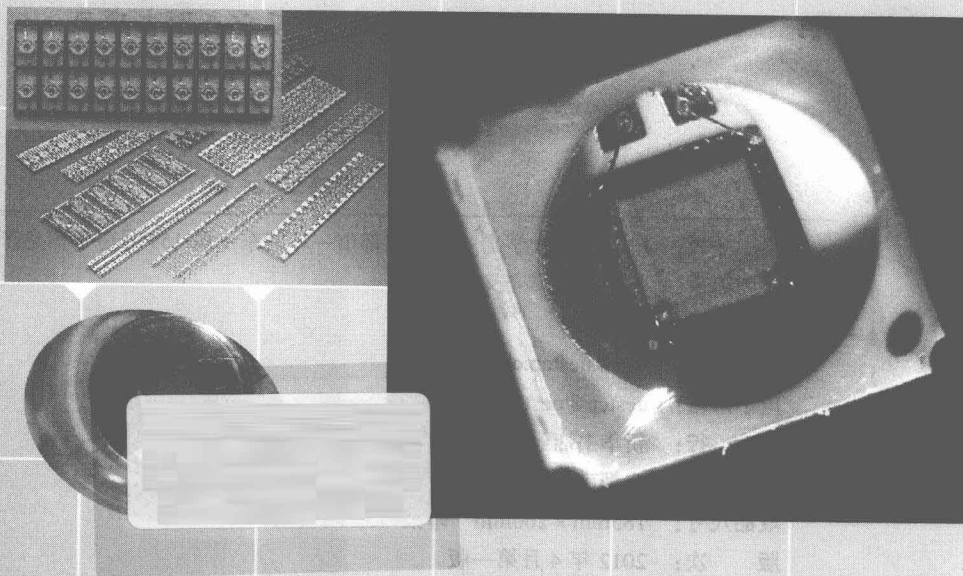
四川省2011年度重点图书项目

太阳能光伏与照明应用技术系列教材

半导体 照明导论

bandaoti zhaoming daolun

饶海波 主 编



电子科技大学出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

半导体照明导论 / 饶海波主编. - 成都: 电子科技大学出版社, 2012.4

太阳能光伏与照明应用技术系列教材
ISBN 978-7-5647-1028-6

I. ①半... II. ①饶... III. ①半导体技术: 照明技术-教材 IV. ①TM923.34

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 268795 号

四川省 2011 年度重点图书项目
太阳能光伏与照明应用技术系列教材
半导体照明导论

饶海波 主编

出 版: 电子科技大学出版社 (成都市一环路东一段 159 号电子信息产业大厦 邮编: 610051)
策划编辑: 郭蜀燕 辜守义
责任编辑: 辜守义
主 页: www.uestcp.com.cn
电子邮箱: uestcp@uestcp.com.cn
发 行: 新华书店经销
印 刷: 成都市新都华兴印务有限公司
成品尺寸: 185mm×260mm 印张 13.25 字数 310 千字
版 次: 2012 年 4 月第一版
印 次: 2012 年 4 月第一次印刷
书 号: ISBN 978-7-5647-1028-6
定 价: 36.80 元

■ 版权所有 侵权必究 ■

- ◆ 邮购本书请与本社发行部联系。电话: (028) 83202323, 83201495。
- ◆ 本书如有缺页、破损、装订错误, 请寄回印刷厂调换。

四川省 2011 年度重点图书项目
太阳能光伏与照明应用技术系列教材

丛书编委会人员名单

主 审：吴援明

主 编：于军胜 饶海波 李 伟 李绍荣 祁康成 严高师

参编人员（按姓名笔画排序）：

丁 坤 于军胜 万远涛 万贤龙 王文丽
王 军 王 玮 龙剑平 祁康成 杨昕梅
李 伟 李绍荣 宋继荣 林 慧 周琳淞
钟 建 胡 玥 饶海波 高 原 高寒松
唐普英 顾德恩 黄宇红 曹贵川 曾红娟
谢立坤 廖骏源

序

人类社会发展到现阶段，自然资源与生存环境面临着非常严峻的挑战。当前世界各国致力于资源节约型与环境友好型社会的建设，因此，作为“开源节流”型的太阳能光伏技术和高效固态照明技术，符合社会发展的历史潮流和国家节能减排的大政方针。但是，当前我国在太阳能光伏和新型照明领域的人才非常缺乏，相关的教材和图书配套很不完善，本系列教材所涉及的八本系列性的图书正是在这个背景下规划、出版的，可以满足理工科院校的新专业的需求、高校院所人才培养和科学研究的要求。编委会由多名教授、博导以及博士青年教师组成，在材料的制备、表征、性能优化、器件工艺及应用技术等方面，具备丰富的教学与科研经验。我们相信，该系列教材可以为国家“卓越工程师计划”在相关光电材料与器件领域提供参考与帮助。

吴援明

2011年8月

前 言

从 50 多万年前燃烧着的木头，到 1772 年的煤气照明、1879 年的白炽灯、1938 年的荧光灯，照明光源的发展与人类社会的活动和进步密切相关。长期以来，居室照明常见的是钨丝白炽灯和节能荧光灯，工作场所照明用的是荧光灯以及街道照明用的是钠灯。近年来，半导体照明（亦称固态照明）技术不断突破，应用领域日益扩展。

半导体照明是指用全固态发光器件（LED，发光二极管）作为光源的照明，具有高效、节能、环保、寿命长、易维护等显著特点，是人类照明史上继白炽灯、荧光灯之后的又一场照明光源的革命。

目前全世界大约 21% 的电能用于照明，如果换成高效的固体冷光源（半导体发光二极管），这些能量中几乎一半都可以节省下来。半导体照明有着巨大的市场与技术创新空间，被公认为是转变经济发展方式、调整产业结构、带动相关产业发展、实现可持续发展的重要手段，也是 21 世纪最具发展潜力的战略性新兴产业之一。随着技术进步与市场应用的迅速增长，半导体照明产业发展前景极为广阔。

本书主要阐述半导体照明器件的基础——半导体发光二极管的原理、结构和制备技术，发光二极管的光学设计——高效光抽取方法，以及白光发光二极管的实现方案。在主要涉及半导体发光二极管的材料、机理及其制造技术的同时，本书对器件的光电参数测试方法，器件的可靠性分析、驱动和控制方法，以及各种半导体照明的应用技术也进行了必要的介绍。本书内容力求系统、全面，通过理论联系实际，重点突出“半导体照明技术”的主题，力争反映国内外相关领域的最新进展。书中有些内容也反映了作者及同事在这一领域的科研成果。

我们希望本书对从事半导体照明技术研发和应用的相关人员有所帮助。本书也可以作为研究生和大学高年级学生半导体照明课程的教科书以及半导体物理、电子器件设计、照明技术和光学相关课程的参考书。

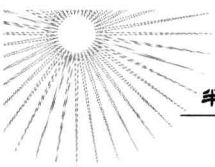
由于编者能力有限，书中难免会出现一些错误和偏差，欢迎读者批评指正。

编者

2012 年 3 月 28 日

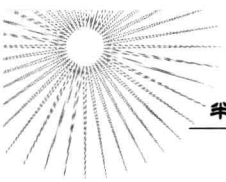
目 录

第 1 章 视觉、光度学和色度学	1
1.1 光学概述	1
1.1.1 光的基本概念和理论	1
1.1.2 光的产生	1
1.2 视觉	3
1.2.1 人类的视觉	3
1.2.2 光谱光视效率	4
1.3 光度学	5
1.4 色度学	8
1.4.1 颜色	8
1.4.2 与颜色有关的照明参量	13
第 2 章 半导体发光原理	16
2.1 复合理论	16
2.1.1 直接复合	17
2.1.2 间接复合	18
2.1.3 表面复合	22
2.1.4 俄歇复合	23
2.2 发光复合	26
2.2.1 LED 光源的各种效率	26
2.2.2 注入发光	27
2.3 PN 结的注入	32
2.3.1 PN 结的基本结构	33
2.3.2 PN 结内建电势差	34
2.3.3 PN 结电流	35
2.4 异质结构和量子阱	43
第 3 章 高亮度 LED 材料	49
3.1 对材料的要求	49
3.2 高亮度材料体系	50
3.3 异质结构及生长技术	58
第 4 章 从发光二极管中引出光	61



4.1	光引出的基础	61
4.1.1	逸出角锥	61
4.1.2	分布 Bragg 反射器	63
4.1.3	吸收损耗和光子循环利用	64
4.2	平面矩形高亮度发光二极管的光子学	65
4.2.1	AlGaAs 红色发光二极管	65
4.2.2	AlGaInP 发光二极管	66
4.2.3	AlInGaN 发光二极管	69
4.3	非矩阵和非平面结构中光子的输出耦合	72
4.3.1	异形芯片	72
4.3.2	外输出耦合器	74
4.3.3	非谐振腔发光二极管	74
4.4	光子态密度工程	75
4.4.1	谐振腔发光二极管	76
4.4.2	表面等离子增强型发光二极管	78
4.4.3	光子晶体	79
第 5 章	固体白光灯及 LED 封装	82
5.1	人造白光的优化	82
5.1.1	发光效率和显色性的折中	82
5.1.2	二基色体系	84
5.1.3	多基色体系	84
5.2	荧光粉转换 LED	85
5.2.1	二基色荧光粉转换 LED	85
5.2.2	多基色荧光粉转换 LED	88
5.3	多芯片 LED	89
5.3.1	二基色多芯片 LED	89
5.3.2	多基色多芯片 LED	90
5.4	白光 LED 用荧光粉	92
5.5	荧光粉涂覆工艺控制	94
5.6	LED 封装	95
5.6.1	LED 器件的整体设计	96
5.6.2	LED 封装技术综述	100
5.6.3	LED 封装技术的发展趋势	106
第 6 章	半导体照明驱动和控制	108
6.1	LED 驱动技术	108
6.1.1	LED 的电学性能特点	108
6.1.2	电源驱动方案	108

6.1.3	驱动电路基本方案	109
6.1.4	LED 驱动器的特性	113
6.1.5	LED 与驱动器的匹配	115
6.2	LED 驱动器	118
6.2.1	电容降压式 LED 驱动器	118
6.2.2	电感式 LED 驱动器	118
6.2.3	电荷泵式 LED 驱动器	119
6.2.4	LED 恒流驱动器	121
6.3	LED 集成驱动电路	121
6.3.1	电荷泵驱动 LED 的典型电路	121
6.3.2	开关式 DC/DC 变换器驱动 LED 的典型电路	130
6.3.3	限流开关 TPS2014/TPS2015	136
6.3.4	六路串联白光 LED 驱动电路 MAX8790	139
6.3.5	集成肖特基二极管的恒流白光 LED 驱动器 LT3591	140
6.3.6	低功耗高亮度 LED 驱动器 LM3404	142
6.3.7	具有诊断功能的 16 通道 LED 驱动器 AS1110	143
6.4	控制技术	144
6.4.1	调光	144
6.4.2	调色	145
6.4.3	调色温	146
6.4.4	智能照明	146
第 7 章	OLED 照明	147
7.1	概述	147
7.2	有机 / 聚合物半导体	148
7.2.1	有机/聚合物半导体材料	148
7.2.2	用于有机电致发光的有机半导体材料	149
7.3	有机 / 聚合物电致发光器件的结构及工作原理	152
7.3.1	有机聚合物电致发光器件的结构	152
7.3.2	有机 / 聚合物电致发光器件的工作原理	153
7.3.3	器件的工作特性	155
7.3.4	有机薄膜的形态结构对器件性能的影响	159
7.3.5	表面与界面结构对器件性能的影响	160
7.4	有机电致发光材料	162
7.4.1	小分子有机电致发光材料	162
7.4.2	聚合物电致发光材料	165
7.4.3	三线态电致发光材料	167
7.5	有机发光二极管的制备工艺	168
7.5.1	基片清洗	169



7.5.2	预处理	169
7.5.3	有机薄膜的制备	170
7.5.4	金属电极的制备	173
7.5.5	OLED 的稳定性和寿命	173
第 8 章	半导体照明应用	175
8.1	发光二极管驱动电路	175
8.1.1	发光二极管列	175
8.1.2	用电池工作的发光二极管	177
8.1.3	大功率脉冲驱动	178
8.2	强光信号灯	179
8.2.1	交通信号灯	179
8.2.2	汽车信号灯	180
8.2.3	其他信号灯	182
8.3	显示器	183
8.3.1	字符显示器	183
8.3.2	全色大屏幕电视	184
8.4	医学应用	186
8.4.1	新生儿黄疸的光疗	186
8.4.2	光动力理疗	186
8.4.3	牙科复合材料的光固化	187
8.4.4	季节性不适应症的光疗	188
8.5	光合作用	188
8.5.1	作物生长	189
8.5.2	光生物反应	190
8.6	光学测量	191
8.6.1	荧光传感器	192
8.6.2	时域和频域光谱	193
8.6.3	其他光学应用	195
8.7	照明	195
8.7.1	局部照明	196
8.7.2	普通照明	197
8.7.3	固体照明的未来	199
参 考 文 献	200

第 1 章 视觉、光度学和色度学

1.1 光学概述

1.1.1 光的基本概念和理论

从物理学上说,光是一种电磁辐射。在整个电磁辐射波谱中,光波只占据很小的一部分(如图 1-1 所示)。光波的波长区间在 380nm~780nm 之间。人眼所能看见的光称为可见光。

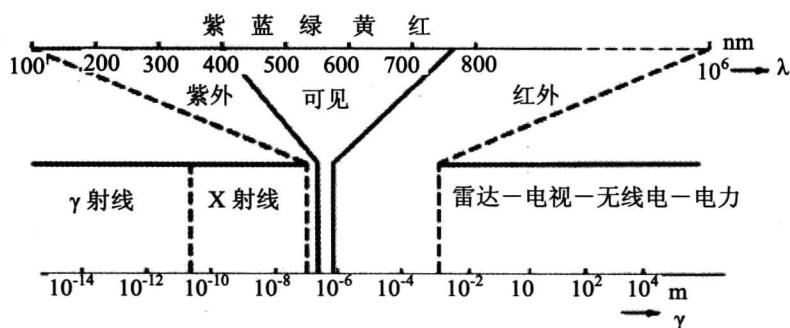
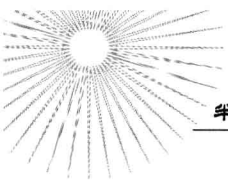


图 1-1 电磁波谱

在可见光中,波长最短的是紫光,稍长的是蓝光,红光的波长最长。在不可见光中,波长比紫光更短的部分称为紫外线,比红光波长更长的叫做红外线。紫外线又分为 3 个区,即远紫外(UV—C, 波长 $\lambda=100\sim 280\text{nm}$)、中紫外[UV—B, $\lambda=280\sim 315\text{nm}$]和近紫外(UV—A, $\lambda=315\sim 400\text{nm}$);红外线也分为 3 个区[即近红外(1R—A, $\lambda=780\sim 1400\text{nm}$)、中红外(1R—B, $\lambda=1.4\sim 3\mu\text{m}$)和远红外(TR—C, $\lambda=3\mu\text{m}\sim 1\text{mm}$)]。需要说明的是,各个区域的界限不是很严格,只是给出了大致的范围。LED 也分为可见光 LED($\lambda=450\sim 780\text{nm}$)和不可见光 LED($\lambda=850\sim 1550\text{nm}$)两种。其中,不可见光 LED 又分红外线 LED($\lambda=850\sim 950\text{nm}$)和光通信 LED/LD($\lambda=1300\sim 1550\text{nm}$)。半导体 LED 之所以能发出不同的光色,就是因为它们的波长各异。例如,使用 AlInGaP 材料制得的 LED 波长可为 590nm、611nm 和 625nm,所以可以发射黄光、橙光和红光。

1.1.2 光的产生

通常,光按两种方式产生,即温度辐射和发光。温度辐射又称热辐射,就是指物质在高温下辐射出热能。蜡烛、白炽灯的发热就是人所共知的现象。在热辐射进程中,发出辐射的物体内部能量并不改变,只依靠加热来维持它的温度,使辐射得以持续地进行下去。低温时辐射发红外光,500℃左右即开始辐射暗红色的可见光,温度越高,短波长的辐射便更丰富,1500℃时即发出白炽光,其中相当多的是紫外光。对某一温度下,作为最大温



度辐射的物体，称为黑体，这种辐射即是黑体辐射。黑色的物体对光和热有良好的吸收作用，辐射是吸收的逆进程。因此吸收好的黑体其辐射也最大。通常的标准灯便是热辐射光源，这种光源有两个主要参数：一个是描述发光强弱的，称为光强；另一个是描述光源的辐射能量随波长变化的光谱分布的，称为色温。当某一白炽灯光源的光谱分布和温度为 T 的黑体的辐射的光谱分布相同时， T 即为该光源的色温。黑体辐射的能量分布曲线 $E(\lambda)$ 可由普朗克公式描述为

$$E(\lambda) = \frac{2\pi c^2 h}{\lambda^5 \left(e^{hc/\lambda kT} - 1 \right)} \left(\text{W/m}^3 \right) \quad (1-1)$$

式中， λ 为波长(m)； h 为普朗克常数(J / s)； c 是真空中光速(m/s)； k 为玻耳兹曼常数(J / K)； T 是绝对温度(K)。当知道光源的色温，即可由式(1-1)求得其光谱分布。

发光是发光物体依靠除温度以外的原因产生可见光的现象的总称。发光就是其他任何种类的能量转换成光能的过程，通常通过激发过程来完成，所以又称为激发发光。由于物质的种类和激发的种类不同，其发光波长范围也不同。按激发的方式不同，可分如下几类：

(1) 生物发光：萤火虫、发光细菌等的生物发光。

(2) 化学发光：由化学反应直接引起的发光，物质的燃烧属于化学反应，由这种反应引起的发光是热辐射。黄磷因氧化而自燃发光就是这种例子。

(3) 光致发光：由光、紫外线、X 射线等激发而引起的发光。由汞蒸气产生的紫外线激发荧光粉，能高效率地转变为可见光，这就是已被广泛使用的荧光灯。X 射线和 R 射线激发也能产生可见光。

(4) 阴极射线发光：由电子束激发荧光物质发光，其应用例子是电视机的显像管，它又称为阴极射线管。

(5) 燃烧发光：碱金属和碱土金属及其盐类，放在火中燃烧发出特有的光，被用作焰色反应，如钠离子为黄光、锶离子为猩红色光等。

(6) 电致发光：没有像白炽灯那样转变为热能再发光的现象，而直接由电能转变为光能。

1) 气体或伴随气体放电而发光，如霓虹灯和各种放电灯。

2) 加交流或直流电场于硫化锌等粉末材料而产生发光，如场致发光板。

3) 在 AlGaAs、AlInGaP、AlInGaN 等一类半导体 PN 结处注入载流子时的发光，如通常的发光二极管。还有一些小分子有机物或聚合物半导体制成有机物发光二极管的发光。

激发是一个能量转移过程。一个系统得到激发，得到能量由低能态 E_1 跃迁到高能态 E_2 ，当它由高能态回到低能态时，根据能量守恒原理，多余的能量就可能以光的形式释放出来，这就是激发发光。发光波长的长短决定于能量差 $\Delta E = E_2 - E_1$ ， ΔE 正是发射的光子所具有的能量，由上式得： $\Delta E = hv = hc/\lambda$

当由高能态回到低能态时，不一定就有辐射，非辐射复合还是存在的，在实际激发过程中要使辐射复合增加，应尽量减少非辐射复合。

1.2 视觉

1.2.1 人类的视觉

照明技术依赖于人类视觉的性质。视觉是对周围环境的亮度和色度变化产生意义的一个复杂的多级过程。视觉的性质决定了对照明的量和质的要求。视觉是人由进入人眼的辐射所产生的光感觉而获得的对外界的认识。人的视觉器官不但反映光的强度，而且也能反映光的波长特性。前者表现为亮度的感觉，后者表现为颜色的感觉。视觉不是瞬间即逝的，目前还存在人们未知的一些领域，其过程和特性相当复杂。

视觉是由大脑和眼睛密切合作而形成的。人的视觉系统类似于图像处理系统，主要由眼球肌、眼睛的光学系统和视神经系统三部分组成。眼睛在眼球肌的作用下运动，捕捉光线。光线通过眼睛的光学系统聚集在视网膜上，并通过电化学反应传输至视神经，最终传输至大脑，产生光的的感觉，同时还产生信号控制瞳孔大小和眼球的运动等。

视觉的主要过程发生在眼睛中，图像投映在视网膜上。视网膜由感光细胞组成，它们将光能转换为神经刺激。感光细胞有杆状和锥状两类。杆状细胞灵敏度高，对眼睛适应了黑暗后的暗视觉起重要作用。然而，杆状细胞不能分辨色彩，因为它们只含一种类型的感光色素。不言而喻，这些感光细胞集中在视网膜的外围部分，所以引起外围视觉。

在高亮度下，杆状细胞响应饱和，视觉完全由锥状细胞引起（明视觉）。锥状细胞可能含有视红素、绿敏素和蓝敏素三种感光色素中的一种，分别称为L型（长波）、M型（中波）以及S型（短波）锥状细胞。由于光谱灵敏度不同，这些感光色素使我们能够区分色彩。锥状细胞集中在视网膜的中心部分（中心凹），密度在外围下降。明视觉灵敏度较低但空间分辨率较高。

由于暗视觉和明视觉涉及不同的感光细胞，它们具有不同的光谱灵敏度（如图1-2所示）。杆状细胞的光响应和视网膜前组织的透射率决定了暗视觉灵敏度谱，在空气中谱峰位于蓝绿区域的507nm。明视觉谱相对于暗视觉有红移。明视觉灵敏度的峰值位于黄绿区域，在空气中的波长为555nm。

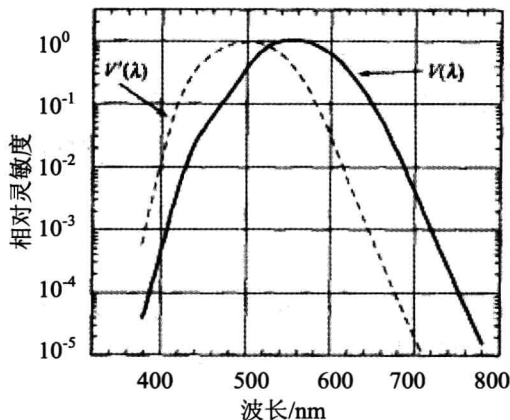
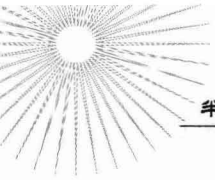


图 1-2 归一化的明视觉灵敏度曲线[实线, $V(\lambda)$]和暗视觉灵敏度曲线[虚线, $V'(\lambda)$]



1. 明视觉

在亮度超过 $10\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}$ 的环境里, 视觉完全由眼中视网膜背面的锥状感受细胞起作用, 最大的视觉响应在绿色区的 555nm 处。这条明视觉视见函数曲线是在大量实验工作的反复比较之后, 于 1924 年得到国际公认的。它在光度单位、颜色和光测量中起着极为重要的作用。在明视觉条件下, 正常人的眼睛都能感受到颜色。相应波长的颜色标在图的上方。曲线以 $V(\lambda)$ 表示。

2. 暗视觉

当环境亮度低于 $10^{-2}\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}$ 时, 就属于暗视觉的范围。眼睛适应暗视觉状态所需时间约 45min , 而明视觉的适应时间仅需 $2\sim 3\text{min}$ 。暗视觉视见度曲线以 $V'(\lambda)$ 表示, 即图 1-2 中左面的曲线, 其峰值约在 507nm , 和 $V(\lambda)$ 相比较, 峰值波长移向可见光谱的蓝端, 相距 48nm 。此外, 单色视见度峰值也从 680lm/W 提高到 1725lm/W , 高达 2.54 倍。

暗视觉的特点是, 用视觉中心看物体时反而不如用眼角看得清楚。其原因是, 在亮度水平极低的情况下主要由视网膜背面的柱状感受细胞起作用, 而它在视网膜的中央凹处很少。与锥状感受细胞不同, 柱状感受细胞对颜色差异不灵敏, 因此, 暗视觉状态下的世界是无色的。

3. 中间视觉

当景物的亮度增加到 $10^{-2}\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}$ 以上时, 除明亮度增加外, 还可以发现三个效应: 第一, 中央凹处的视觉开始变得和边缘部分一样容易, 随后还会变得更容易。第二, 可以感觉到的颜色开始时很弱, 随后逐渐增强。第三, 不同颜色的相对明亮度发生变化, 尤其是红色的明亮度比蓝色的明亮度显得更强。这些都是由于随着亮度的变化, 锥状感受细胞和柱状感受细胞对视觉的作用也发生了变化。中间视觉 ($10^{-2}\sim 10\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}$) 下对不同波长的总响应, 均位于如图 1-2 所示的两条曲线之间, 且随着亮度的增加, 从左边移向右边, 视见度的峰值则逐渐下降。

人类的大多数活动是在明视觉下进行的, 从照明技术的角度来说, 明视觉是最重要的。因此, 为校正明视觉的光谱响应和色彩分辨率以及将其数字化, 人们进行了大量研究工作。1924 年, 国际照明协会(CIE)推荐了明视觉的相对视觉灵敏度函数 $V(\lambda)$ 。1951 年, 推荐了暗视觉类似的函数 $V'(\lambda)$ 。两个函数都表示在图 1-2 中。函数 $V(\lambda)$ 定义在 $380\sim 780\text{nm}$ 范围内。电磁辐射的这个波长区间基本上确定了可见光谱区域。

虽然人们的视觉系统结构基本相同, 但是在不同的个人之间存在着差别, 在同一个人的不同阶段也存在着变异。这些差别和变异具有一定的规律性, 有的则是随机变化的, 这都需要在照明设计时加以考虑。

1.2.2 光谱光视效率

人眼对不同光谱可见光的灵敏度用光谱光视效率指标来评价。光谱光视效率值在 $0\sim 1$ 之间, 其与波长之间的关系曲线如图 1-3 所示。

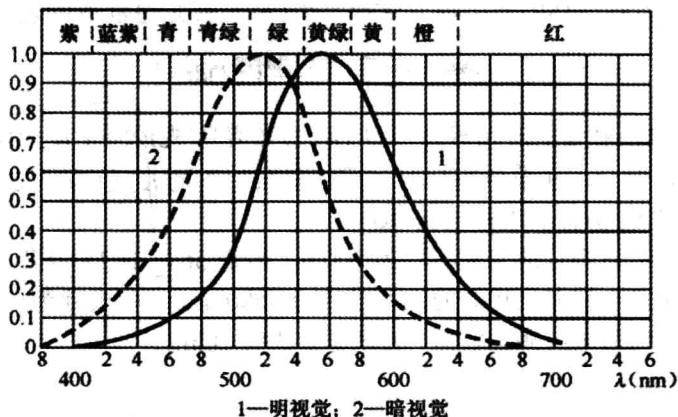


图 1-3 光谱光视效率与波长的关系曲线

1—明视觉；2—暗视觉

人眼对不同波长可见光的灵敏度不同，对波长为 555nm 的黄绿光的感受效率最高，而对其他波长的光的感受效率较低。因此，555nm 称为峰值波长 λ_m ，而用来表示辐射能所引起的视觉能力的量叫做光谱光视效能 K ，555nm 波长的光谱光视效能 $K_m = 683 \text{ lm} \cdot \text{W}^{-1}$ 。其他任意波长 λ 的光谱光视效能 $K(\lambda)$ 与 K_m 之比就是光谱光视效率，用 $V(\lambda)$ 表示，它随波长而变化，即

$$V(\lambda) = K(\lambda) / K_m \quad (1-1)$$

式中， $K(\lambda)$ 为给定波长是的光谱光视效能； K_m 为峰值波长 λ_m 的光谱光视效能，即 $683 \text{ lm} \cdot \text{W}^{-1}$ ； $V(\lambda)$ 为给定波长的光谱光视效率。

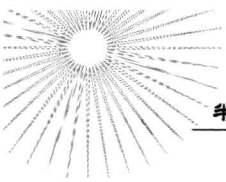
在不同的视觉亮度下，人眼的光谱光视效率不同。当亮度在 $10 \text{ cd} \cdot \text{m}^{-2}$ 以上时，人眼为明视觉， $100 \text{ cd} \cdot \text{m}^{-2}$ 和 $1000 \text{ cd} \cdot \text{m}^{-2}$ 下的眼睛反应都一样，光谱光视效率没有什么不同；当亮度在 $10^{-6} \sim 10^{-2} \text{ cd} \cdot \text{m}^{-2}$ 之间时，人眼为暗视觉。在暗视觉情况下，人眼光谱光视效率曲线峰值要向波长较短的方向移动，其最大灵敏度值一般出现于 507nm 处(见图 1-2)。亮度为 $0.01 \sim 10 \text{ cd} \cdot \text{m}^{-2}$ 时的视觉状态称为中介视觉。道路照明的路面亮度一般不超过 $10 \text{ cd} \cdot \text{m}^{-2}$ ，正是在中介视觉的范围内。在中介视觉情况下，由于没有一个固定的峰值波长，也就无法用一条曲线来表示光谱光视效率。

在暗视觉条件下，只能看到物体的大致形状，但不能分辨细节，也不能辨别颜色，感觉所有的物体都是蓝灰色的。只有在感觉明亮的环境中，人们才能清楚地分辨出物体的五颜六色，而且波长较长的红光显得尤为明亮。

1.3 光度学

1. 光通量 Φ

光源在单位时间内发出的光量称为光源的光通量，通常用符号 Φ 表示，单位为流明 (lm)，它是根据辐射对标准观察者的作用导出的光度量。



对于明视觉，若辐射体的光谱辐射通量为 $\Phi_e(\lambda)$ ，其光通量 Φ 的表达式为

$$\Phi = K_m \int_0^\infty \frac{d\Phi_e(\lambda)}{d\lambda} V(\lambda) d\lambda \quad (1-2)$$

式中， $d\Phi_e(\lambda)/d\lambda$ 为辐射通量的光谱分布； $V(\lambda)$ 为光谱光(视)效率； K_m 为辐射的光谱光(视)效能的最大值 ($\text{lm} \cdot \text{W}^{-1}$)，在单色辐射时，明视觉条件下的 K_m 值为 $683 \text{ lm} \cdot \text{W}^{-1}$ (当 $\lambda_m = 555\text{nm}$ 时)； Φ 为光通量 (lm ， $1\text{lm} = 1\text{cd} \cdot 1\text{sr}$)。

例如，普通 60W 白炽灯的光通量约为 500lm，普通 36W 的 T8 管荧光灯的光通量约为 2500lm，70W 的陶瓷金属卤化物灯的光通量约为 6600lm，芯片尺寸为 $1\text{mm} \times 1\text{mm}$ 并采用倒装焊技术的白光 LED 在 150mA 以下的光通量约为 20lm。

2. 发光强度(光强) I

光源在给定方向的单位立体角内发出的光通量定义为光源在该方向上的发光强度(简称光强)，以 I 表示，单位为坎德拉(cd)，也就是过去使用的烛光， $1\text{cd} = 1\text{lm} \cdot 1\text{sr}^{-1}$ 。

cd 是国际单位制和我国法定单位制的基本单位之一，其他光度量单位都由其导出。

发光强度常用于说明光源或灯具发出的光通量在空间各个方向或在选定方向上的分布密度。

3. 光照度 E

在被照物体表面上，单位面积内所接收到的光通量称为光照度(简称照度)。光照度是表征表面被照明程度的量，以 E 表示，单位为勒克斯 (1x)， $1\text{x} = 1\text{lm} \cdot \text{m}^{-2}$ 。如微小面积 dS 上受到的光通量为 $d\Phi$ ，则 E 为

$$E = \frac{d\Phi}{dS} \quad (1-3)$$

照度的单位除了 1x 外，在北美地区还使用英尺烛光(fc)， $1\text{fc} = 10.671\text{x}$ 。在工程上还曾经用过辐透(ph)、毫辐透(mph)等。

11x 的照度是比较小的，在此照度下只能大致地辨认周围物体。通常，满月夜晚的地面照度约为 0.21x ，白天采光良好的室内照度为 $100 \sim 500\text{x}$ ，晴朗的室外太阳非直射下的地面照度为 $10^3 \sim 10^4\text{x}$ ，而中午太阳照射下的地面照度可达 10^5x 。

在照明质量的量化指标中，一般推荐办公室的平均水平照度为 $500 \sim 1000\text{x}$ ；在商业照明中，推荐的垂直照度平均值为 $300 \sim 500\text{x}$ 。

4. 光出射度 M

对于有一定表面积的发光体，在不同位置上的发光程度可能不同，因此需要用光出射度来表征。光出射度是指单位面积发出的光通量，以 M 表示，单位为 $\text{lm} \cdot \text{m}^{-2}$ 。若在发光体表面上任取的微小单元面积是 dA ，发出的光通量为 $d\Phi$ ， M 则为

$$M = \frac{d\Phi}{dA} \quad (1-4)$$

光出射度主要针对面光源而言。这里所说的面光源还包含不发光的表面受到光照后形成的二次发光面，其出射度为

$$\text{①反射发光} \quad M = \rho E \quad (1-5)$$

$$\text{②透射发光} \quad M = \tau E$$

式中， ρ 为被照面的反射系数(反射比)； τ 为被照面的透射系数(透射比)； E 为被照射

的二次发光面上的照度。

照度和光出射度有类似的定义和相同的量纲，其区别在于照度表示受照面所接收到的光通量的表面密度，而光出射度表示发光面所发出的光通量的表面密度。

5. 亮度 L

光的出射度只表示单位面积上发出光通量的多少，没有考虑光辐射的方向，不能表征发光面在不同方向上的光学特性。如图 1-3 所示，在一个广光源上取一个单元面积 dA ，从与表面法线成 θ 角的方向上观察，在这个方向上的光强与人眼所“见到”的光源面积之比，定义为光源在该方向的亮度。由图 1-3 得到的光源面积 dA' 及亮度 L_θ 为

$$\begin{aligned} dA' &= dA \cos \theta \\ L_\theta &= \frac{d\Phi}{d\omega dA \cos \theta} = \frac{I_\theta}{dA \cos \theta} \end{aligned} \quad (1.6)$$

式中， θ 为面积元 dA 的法线与给定方向之间的夹角。

亮度的单位为坎德拉每平方米($\text{cd}\cdot\text{m}^{-2}$ ，也可用尼特表示)。

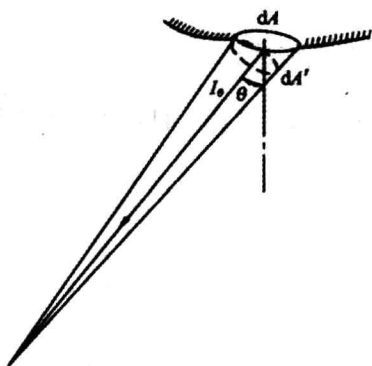


图 1-3 广光源一个单元面积上的亮度

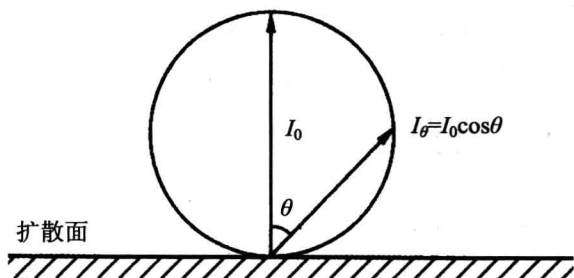


图 1-4 理想漫反射面的光强分布

如果 dA 是一个理想的漫射发光体或理想漫反射表面的二次发光体，它的光强将按余弦规律分布（见图 1-4）。

将 $I_\theta = I_0 \cos \theta$ 代入式 (1.6) 得：

$$L_\theta = \frac{I_0 \cos \theta}{dA \cos \theta} = \frac{I_0}{dA} = L_0 \quad (1.7)$$

则亮度 L_θ 与方向无关，常数 L_0 表示从任意方向看，亮度都是一样的。对于完全扩散的表面，光出射度 M 与亮度 L 的关系为：

$$M = \pi L_0 \quad (1.8)$$

表 1-1 给出了一些实际光源的亮度近似值，以供读者参考。

表 1-1 一些实际光源的亮度近似值 (单位: $\text{cd}\cdot\text{m}^{-2}$)	
光源	亮度
无月的夜空	10^{-4}
从地球上看到的满月表面	2.5×10^3