



国外优秀科技著作出版专项基金资助

# INTRODUCTION TO SOLID-STATE LIGHTING

# 固体照明导论

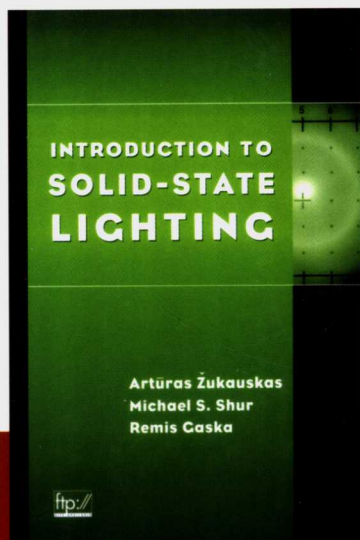
[立陶宛] A. 茹考斯卡斯 (Artūras Žukauskas)

[美] 迈克尔 S. 舒尔 (Michael S. Shur) 著

[美] 勒米·加斯卡 (Remis Gaska)

黄世华 译 滕枫 校

Chemical Industry Press



化学工业出版社

材料科学与工程出版中心



国外优秀科技著作出版专项基金资助

# 固体照明导论

[立陶宛] A. 茹考斯卡斯

[美] 迈克尔S. 舒尔 著

[美] 勒米·加斯卡

黄世华 译

滕枫 校



化学工业出版社  
材料科学与工程出版中心

· 北京 ·

## (京) 新登字 039 号

图书在版编目 (CIP) 数据

固体照明导论/[立陶宛] 茹考斯卡斯 (Žukauskas, A.), [美] 舒尔 (Shur, M. S.), [美] 加斯卡 (Caska, R.) 著; 黄世华译. —北京: 化学工业出版社, 2005. 8  
书名原文: Introduction to Solid-State Lighting  
ISBN 7-5025-7619-3

I. 固… II. ①茹…②舒…③加…④黄… III. 照明-技术 IV. TU113.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 102944 号  
Introduction to Solid-State Lighting/by Artūras Žukauskas, Michael S. Shur, Remis Gaska

ISBN 0-471-21574-0

Copyright©2002 by John Wiley & Sons, Inc.. All rights reserved.

Authorized translation from the English language edition published by John Wiley & Sons, Inc.

本书中文简体字版由 John Wiley & Sons 出版公司授权化学工业出版社独家出版发行。

未经许可, 不得以任何方式复制或抄袭本书的任何部分。

北京市版权局著作权合同登记号: 01-2004-6554

### 固体照明导论

[立陶宛] A. 茹考斯卡斯  
[美] 迈克尔 S. 舒尔 著  
[美] 勒米·加斯卡

黄世华 译

滕枫 校

责任编辑: 杜春阳

文字编辑: 林丹

责任校对: 边涛

封面设计: 潘峰

\*

化学工业出版社 出版发行  
材料科学与工程出版中心  
(北京市朝阳区惠新里3号 邮政编码 100029)

购书咨询: (010) 64982530

(010) 64918013

购书传真: (010) 64982630

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

\*

新华书店北京发行所经销  
大厂聚鑫印刷有限责任公司印刷  
三河市延风装订厂装订

开本 720mm×1000mm 1/16 印张 12¼ 字数 219 千字

2006 年 1 月第 1 版 2006 年 1 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-7619-3

定 价: 29.00 元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责退换

## 译 者 的 话

从 20 世纪 90 年代后期 III-V 族半导体蓝色发光二极管研制成功并应用以来，世界上很多国家和地区对与之相关的领域投入了大量研究力量和经费。这些投入带来了照明技术新的革命。也许不久以后，我们或我们的子女就将生活在固体照明时代。

2002 年出版的 *Introduction to Solid-State Lighting* 一书对这个领域做了简要而全面的介绍。在简述了照明的历史、光度学和色度学基础以及现有的照明技术后，对固体照明技术从三个方面进行了阐述：固体照明的核心——半导体发光二极管的原理、结构和制备方法；发光二极管的光学设计——如何有效地把光从芯片上引出来；怎样用发光二极管得到照明所需要的白光。本书对固体照明及发光二极管的其他应用也做了述评，书后列出了这个领域中大量的参考文献。

2003 年，代表美国半导体工业界的化合物半导体在线 (CompoundSemi Online) 首次颁发 CompoundSemi 先驱奖给五位获奖者，表彰他们在蓝光器件研究和发展中的贡献，本书作者之一 Shur 是其中一位。颁奖声明中称“他和 Žukauskas 以及 Gaska 合著的《固体照明导论》现已成为这个迅速发展的、确实革命性的领域的一本教科书。”

我们把这本书译为中文，希望能够为我国从事固体照明研究和产业化的科技工作者、管理干部和商务人员提供一本有用的参考书。

由于本书涉及到译者不熟悉的很多领域，难免出现理解和术语翻译上的偏差，欢迎读者批评指正。

译者感谢美国纽约大学医学院的沈世乾博士、黄亚非博士，北京交通大学光电子技术研究所的何志群博士、徐征博士等在翻译中提供的帮助。

2004 年 12 月

北京

给我们的女儿科特琳娜、阿格妮、娜塔莎、柳芭、儿子丹尼乌斯  
和伊格纳斯

——他们将生活在发光二极管照明时代

……一被触摸到，光就分为无数细束，它们走下山坡，分散到你们  
家中……

——立陶宛作家 Joras Biliūnas 《欢乐之光》(1905)

## 前 言

人类五十多万年前“发明”了燃烧的木头，1772年发明了煤气照明，1876年的电照明，1938年的荧光灯——人造光源的这些突破带来了现代照明光源的发展。这些光源有居室照明用的钨丝白炽灯和节能荧光灯，工作场所照明用的荧光灯以及街道照明用的钠灯。目前21%的电能用于照明，如果换用高效的固体冷光源，这些能量中几乎一半可以节省下来。预计到2020年，固体照明累计节约的费用可达1150亿美元。固体照明用可见和紫外发光二极管(LED)，寿命可望超过100 000小时。现在，LED是几乎整个可见光范围内效率最高的彩色光源。荧光粉转换白色LED性能上已经超过了白炽灯，预计到2010年，效率可提高到3倍。从交通灯到道路标志，从汽车尾灯到户外显示器，从景观照明到重点照明，作为下一次照明革命前驱的固体光源已经进入所有这些领域。

半导体物理学家、化学家、材料科学家、照明工程师和商务管理者为固体照明通力合作，使人类能够从这项令人激动的技术中获益。关于发光的半导体灯的各种主题已在科技文献中有所描述。Stringfellow和Carford(1997)以及Mueller(1999a)所编的文集中描述了以AlGaAs、AlGaInP和AlInGaN半导体为基础的现代LED。Nakamura和Fasol(1997)，Nakamura和Chichibu(2000)评述了LED技术的最新成就——AlInGaN基蓝色发光体。本书着重于半导体物理、技术、器件制备以及与新一代发光二极管——高亮度LED相关的首批大规模应用。

我们这本书把固体照明看作是照明技术固有的一个部分。在一个更广泛的背景下考虑高亮度LED。在光源和固体照明技术的范围中谈论高亮度LED的话题。我们也介绍了照明的历史，描述可见光的特征，讨论传统的照明装置，考虑用LED产生白光以及由固体引出光的问题。本书另一个特点是对固体照

明已有和已经出现的应用进行了全面评述。

我们希望本书对固体照明的研发和应用感兴趣的技术人员、科学家、工程师以及商务人员和学生有所帮助。本书也可作为研究生和大学高年级学生固体照明课程的教科书以及半导体物理、材料科学、电子器件设计、照明技术和光学课程的补充参考书。

本书的补充材料可访问：[ftp://ftp.wiley.com/public/sci\\_tech\\_med/lighting](ftp://ftp.wiley.com/public/sci_tech_med/lighting)。

感谢我们各自的妻子无限的耐心、理解、鼓励和支持。

Artūras Žukauskas, Michael S. Shur, Remis Gaska  
Troy, NY, 2001

# 目 录

<b>第 1 章 照明的历史</b> .....	1
<b>第 2 章 视觉、光度学和色度学</b> .....	5
2.1 人类的视觉 .....	5
2.2 光度学 .....	6
2.3 色度学 .....	8
2.4 显色性.....	11
<b>第 3 章 灯泡和灯管</b> .....	15
3.1 白炽灯.....	15
3.2 卤钨灯.....	16
3.3 荧光灯.....	17
3.4 低压钠灯.....	21
3.5 高压放电灯.....	22
3.5.1 汞灯.....	22
3.5.2 高压钠放电灯.....	23
3.5.3 金属卤化物灯.....	24
3.6 无电极放电灯.....	25
3.7 照明的经济核算.....	25
<b>第 4 章 全固体灯基础</b> .....	28
4.1 注入发光.....	28
4.1.1 LED 性能 .....	28
4.1.2 电子和空穴的复合.....	29
4.1.3 p-n 结中的注入 .....	34
4.1.4 异质结构和量子阱.....	36
4.2 高亮度 LED 的半导体材料体系 .....	40
4.2.1 对材料的要求.....	40
4.2.2 AlGaAs 材料体系 .....	42
4.2.3 AlGaInP 材料体系 .....	43
4.2.4 AlInGaN 材料体系 .....	45
4.2.5 异质结构生长技术.....	49
4.3 高亮度 LED 中的电致发光 .....	52

4.3.1	电致发光结构	53
4.3.2	电极和电流扩展	57
4.3.3	发射和电学特性	60
<b>第5章</b>	<b>从发光二极管中引出光</b>	<b>64</b>
5.1	光引出的基础	64
5.1.1	逸出角锥	64
5.1.2	分布 Bragg 反射器	67
5.1.3	吸收损耗和光子循环利用	68
5.2	平面矩形高亮度发光二极管的光子学	69
5.2.1	AlGaAs 红色发光二极管	69
5.2.2	AlGaInP 发光二极管	71
5.2.3	AllnGaN 发光二极管	74
5.3	非矩阵和非平面结构中光子的输出耦合	78
5.3.1	异形芯片	78
5.3.2	外输出耦合器	80
5.3.3	非谐振腔发光二极管	81
5.4	光子态密度工程	82
5.4.1	谐振腔发光二极管	83
5.4.2	表面等离子增强型发光二极管	87
5.4.3	光子晶体	88
<b>第6章</b>	<b>固体白光灯</b>	<b>92</b>
6.1	人造白光的优化	92
6.1.1	发光效率和显色性的折衷	92
6.1.2	二基色体系	94
6.1.3	多基色体系	94
6.2	荧光粉转换 LED	96
6.2.1	二基色荧光粉转换 LED	96
6.2.2	多基色荧光粉转换 LED	99
6.3	多芯片 LED	101
6.3.1	二基色多芯片 LED	102
6.3.2	多基色多芯片 LED	102
<b>第7章</b>	<b>固体灯的应用</b>	<b>105</b>
7.1	发光二极管驱动电路	105
7.1.1	发光二极管列	105
7.1.2	用电池工作的发光二极管	108



7.1.3 大功率脉冲驱动 .....	108
7.2 强光信号灯 .....	109
7.2.1 交通信号灯 .....	109
7.2.2 汽车信号灯 .....	111
7.2.3 其他信号灯 .....	113
7.3 显示器 .....	114
7.3.1 字符显示器 .....	115
7.3.2 全色大屏幕电视 .....	116
7.4 医学应用 .....	118
7.4.1 新生儿黄疸的光疗 .....	118
7.4.2 光动力理疗 .....	119
7.4.3 牙科复合材料的光固化 .....	120
7.4.4 季节性不适应证的光疗 .....	121
7.5 光合作用 .....	121
7.5.1 作物生长 .....	122
7.5.2 光生物反应 .....	124
7.6 光学测量 .....	125
7.6.1 荧光传感器 .....	126
7.6.2 时域和频域光谱 .....	128
7.6.3 其他光学应用 .....	130
7.7 照明 .....	130
7.7.1 局部照明 .....	131
7.7.2 普通照明 .....	133
7.7.3 固体照明的未来 .....	135
<b>参考文献</b> .....	<b>136</b>

# 第 1 章 照明的历史

为了介绍固体照明这个专题，本章对于照明装置先给出一个简要的历史回顾。这个概述是以一些百科全书资料，最近 Bowers 著的一本历史书（1998）及其中的参考文献为基础撰写的。有些详细内容来自大英百科全书（Encyclophoedia Britannica 1911），它提供了 20 世纪第一个十年时照明技术的权威评述。今天的照明装置多数是 20 世纪后期工程化的，关于它们的更详细资料在第 3 章中给出。

光是由电子从高能态跃迁到低能态产生的。激发到高能态可以用种种技术来实现。通常，照明的历史叙述了越来越有效和方便的电子激发及辐射复合的方法。但是，除了最近 200 年外，基础知识的缺乏导致了发展极度缓慢，很多世代的人们尽其一生也看不到照明有明显的变化。

直到 19 世纪初，燃烧产生火焰一直是惟一的人造光。燃烧产生了原子和分子的高能激发态。发射是热发光（pyroluminescence）引起的，源于激发的原子和离子的辐射跃迁、离子结合为分子，以及火焰中固体颗粒的白炽化。

第一个人工照明源是火，50 万年以前，人类就已经广泛地使用火了。可能在同一时期，人类拣起一片燃烧的木头，发明了便携式光源，成为第一个火把。千万年来，燃烧最原始的利用是用在火盆、标灯（悬挂在杆子上的火盆）和火炬（用易燃物——沥青、蜡、松香、脂、油处理过的植物制成）中，今天，它们大都只是作为古董和庆典用品存在。

下一个重要的史前发明是在熔化的脂肪中燃烧纤维。这个发明诞生了灯芯，它是具有毛细作用的一束线，使燃料上升进入火焰中。灯芯可能是第一个照明器件，它大大改善了以热发光为基础的照明的效率。灯芯和蜡芯成为油灯和蜡烛的关键部分。那时的灯是一个浸有灯芯的浅容器。考古发现和岩画表明，石制的灯在三万到七万年前开始使用。之后，贝壳、陶和金属的灯出现了，但是，发光过程并没有本质上的改善。蜡烛通常认为是古罗马时代出现的，它应用了和灯芯相同的原理，而燃料（蜂蜡、牛油，后来是石蜡）是在火焰中熔化的。

18 世纪末，油灯的第一个重要改进标志了近代照明装置工程的开端。这个里程碑归功于日内瓦的阿格兰（Ami Agrand），他设计了具有置于两个同心管中的管状灯芯，火焰周围有一个玻璃灯罩的灯（图 1.1）。由于改善了对火

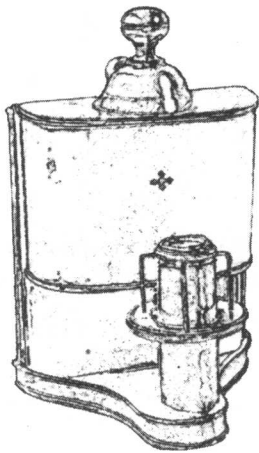


图 1.1 阿格兰灯：第一盏在研究的基础上设计的灯，玻璃灯罩已被取下  
(承蒙伦敦科学博物馆科学和学会图片图书馆准许)

焰的空气供应使燃烧效率提高，光强提高了 10 倍。此外，这种灯还能调节灯芯上下。这个设计是以拉瓦锡 (A. L. Lavoisier) 进行的研究为基础的，他发现燃烧是由于空气中存在氧。这种灯曾向英王乔治三世演示，阿格兰获得一项英国专利 (1784 年 1425 号)。在 19 世纪，人们对油灯提出了大量的改进，包括油的供给方式、灯芯和灯头的设计、矿物油的应用。1850 年出现的煤油灯成为广泛使用的照明装置，对改变大众日落后的活动具有重大影响。这种灯如今仍在为没有电力供应的地区生产。

煤气灯是苏格兰发明家墨多克 (William Murdoch) 1772 年发明的。很快，在 19 世纪初，煤炭工业气体副产品的发光燃烧迅速在城市中被采用，用于家庭户内、工厂和公共照明以及街道照明。在 100 多年中，煤气照明成功地发展，建立起了基础设施、煤气管线、煤气源和维修体系。

第一个固体照明装置是灰光灯 (图 1.2)。这种灯是 1826 年朱蒙德 (Thomas Drummond) 发明的，它包含一个石灰 (氧化钙) 圆柱，在氢氧焰喷管火焰加热下进入明亮耀眼的状态。1820 年戈尼 (Goldsworthy Gurney) 发现了一种新效应——非高温发光 (candoluminescence)。非高温发光是离子热激发引起的超出黑体辐射的发射。在 19 世纪 60~70 年代，灰光灯用于剧院，直到为电弧灯取代。不过，威尔斯巴赫 (Auer von Welsbach) 改进了以非高温发光为基础的光源，他研制了纱罩——浸透了金属盐类溶液的棉织物 (效果最佳的是 1:99 氧化铈和氧化钍)。纱罩被本生灯 (R. W. Bunsen 1855 年发明) 不发光火焰的高温加热。本生灯通过在燃烧前混合一定比例的煤气和空气来工作。威尔斯巴赫纱罩在 20 世纪的前 30 年中广泛应用，之后逐步地为电照明取代。现在我们还能在汽灯中找到它。

电照明的主要原理在 19 世纪初就发现了，当时戴维爵士 (Sir Humphery Davy) 演示了两个电极炭棒之间的放电 (电弧) 以及电流加热一条导线使它变得炽热 (白炽)。他用了由 2000 对铜和锌板组成的电池，这种电池是伏打 (Alessandro Volta) 1800 年发明的。静电在汞蒸气中放电发光的效应在 17 世纪就发现了。尽管戴维演示后人们进行了大量的科学和工程研究，但用电池获得光在经济上是不可行的。照明技术由火焰到电能的转变在 1870 年才发生，那一年，格莱姆 (Z. T. Gramme) 发明了一种有效的连续电流发生器 (电

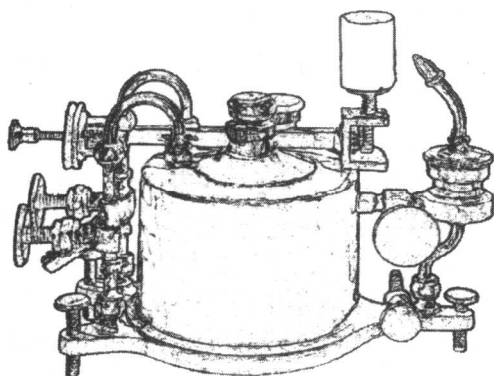


图 1.2 灰光灯：第一个固体照明器件  
(承蒙伦敦科学博物馆科学和学会图片图书馆准许)

动机)。

1876 年，雅布洛奇科夫 (Pavel Yablochkov) 发明了第一个实用的电照明装置 (图 1.3)。它由以绝缘的石膏薄片分开的两条平行炭棒组成，当炭棒烧掉之后，石膏片碎裂成粉末 (因此，不需要调节电极之间距离的装置)。尽管有寿命短 (只有几小时) 的缺点，但雅布洛奇科夫烛很快被用来作为街道照明，使公众对电照明有了良好印象。在几年之中，它们被高性能长寿命 (可达 1000h) 的具有玻璃外壳、电磁自调节部件而且电极经过化学处理的炭弧装置所代替。电弧灯作为道路照明一直用到 20 世纪 20 年代，在两次世界大战中都用作飞机强光照明灯。它是现代高强度放电灯的始祖。

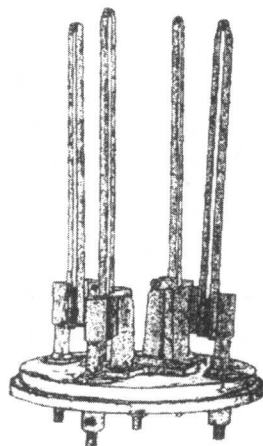


图 1.3 雅布洛奇科夫烛：  
第一个电照明装置  
(承蒙伦敦科学博物馆科学和  
学会图片图书馆准许)

爱迪生 (Thomas Alva Edison) 和斯万 (Joseph Wilson Swan) 是白炽灯丝灯最成功、最卓越的发明家。1879 年末，爱迪生演示了他的装置并获得了灯丝灯的专利 (美国专利，1879 年 223898 号)。斯万在 1879 年初就演示了白炽灯；但是，他的专利第一个主题是抽真空和防止封装处玻璃破碎 (英国专利，1880 年 18 号和 250 号)。两人的研究都从抽真空的玻璃灯泡中炭化纸灯丝出发。晚些时候，爱迪生使用了一种特殊的日本竹的纤维。他也创办了第一个供电系统。白炽灯丝灯的发明伴随着著名的专利诉讼。随后，炭丝灯的迅速商品化催生发展了如今成为电力和照明工业巨头的一些公司：通用电气 (GE，前身为爱迪生电灯公司)，不列颠通用电气 (GEC)，AEG，西门子 (Siemens) 和

飞利浦 (Phillips)。在 19 世纪末, 炭丝灯是户内最常用的照明装置。尽管这样, 为了用一种能工作在更高温度并且蒸发到灯泡上的量较少 (炭使灯泡变黑) 的材料来替代炭, 人们做了很大的努力。1897 年, 能斯特 (Nernst) 发明了氧化铍基固体电解质灯丝。光发射的来源和灰光灯以及汽灯丝罩相同, 而热激发由电流引起。能斯特灯曾具有最高的效率和寿命, 但它很快被金属丝灯代替。虽然高熔点金属韧性差、很难拉成线材, 但这个障碍很快通过逐步应用钨、钽最终是钨被克服了 (A. Just, F. Hanaman, 德国专利, 1903 年 154262 号)。今天的钨丝白炽灯的设计在 20 世纪的最初 3 年就基本上完成了。

人们深入研究了低压气体中的放电, 整个 19 世纪都在实验气体放电灯。但直到 1900 年, 休伊特 (Peter Cooper Hewitt) 才获得汞蒸气灯的专利。这种灯启动时需要机械地倾斜, 而且发射蓝绿色光, 使色彩发生畸变。但是, 它的效率比炭丝灯高得多。为了改善光谱红色区域的显色性, 巴斯蒂安 (C. O. Bastian) 和萨利斯巴瑞 (A. E. Salisbury) 把灯和低温白炽灯结合起来 (1904)。1904 年, 摩尔 (D. M. Moor) 把空气放电灯商业化, 稍迟些时候是二氧化碳和氮气的放电灯。摩尔管有大约 10m 长, 内含约 101.325Pa 的气体, 用高压供电。

克劳德 (P. Claude) 发明了液化空气和将其成分分离的技术。他首先在放电管中充入惰性气体 (1910)。气体放电灯的进一步发展是: 用热阴极 (和电子管中的阴极类似) 降低工作电压, 启动电路, 引入钠蒸气, 以及增加蒸气压使发射光谱变宽。

1938 年, 通用电气和西屋电气公司将新型彩色和白色灯投入市场, 这种灯只是在内管壁涂有荧光粉的低压汞蒸气放电灯。荧光灯应用汞的紫外发射激发光致发光。最早的荧光粉来自矿物。此后, 它们为合成的无机材料所替代, 从 1948 年起, 最普通的白色荧光灯用荧光粉是  $\text{Sb}^{3+}$  和  $\text{Mn}^{2+}$  激活的卤磷酸钙  $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{F}, \text{Cl})$ 。

20 世纪 90 年代末, 在半导体器件照明时代的初期, 居室照明主要是钨白炽灯。紧凑型荧光灯由于高效率而正被积极推广。多数工作环境使用荧光灯, 街道照明则以钠灯为主。然而, 高亮度可见光发光二极管 (LED) 已经有了很多恰得其所的应用, 以它为基础的固体照明正在迅猛发展, 所有这一切就要改变了。

## 第 2 章 视觉、光度学和色度学

本章根据与固体照明最相关的基本问题简要叙述视觉、光度学和色度学。对显色性予以更多的注意，它是“冷光”照明的一个重要性质。更详细的内容可以在专著（例如 Coaton 和 Marsden 1997, Wyszecki 和 Stiles 2000, Rea 2000 以及其中的参考文献）和关于发光二极管的文献（Bergh 和 Dean 1976, Gillessen 和 Schairer 1987, Stringfellow 和 Craford 1997）中找到。

### 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到不同的感光细胞，它们具有不同的光谱灵敏度（图 2.1）。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。

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 2.1 中。函数  $V(\lambda)$  定义在 380~780nm 范围内。电磁辐射的这个波

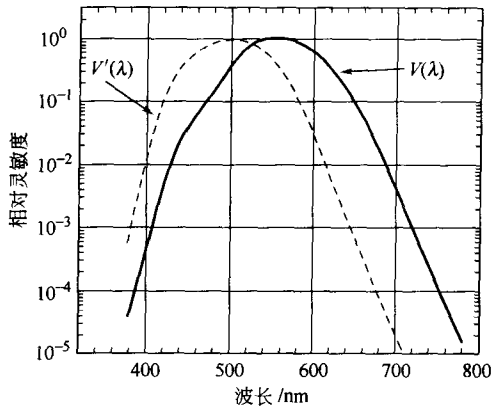


图 2.1 归一化的明视觉灵敏度曲线 [实线,  $V(\lambda)$ , 据 1924CIE] 和暗视觉灵敏度曲线 [虚线,  $V'(\lambda)$ , 据 1951CIE]

长区间基本上确定了可见光谱区域 (Rea 2000)。

## 2.2 光度学

光是电磁波。辐射计量学测量与辐射能量相关的量, 这些量以辐射学量并用归诸于能量 (J) 的单位来表示。例如, 辐射通量  $\Phi_e$  是以瓦度量的辐射能量的速率; 辐射强度  $I_e = d\Phi_e/d\omega$  (W/Sr) 是确定方向上单位立体角内的辐射通量。光度学处理光亮度的视觉。因此, 光度学与辐射计量学的不同在于它测量的是视觉响应。相关的量以光度学量表示。光通量  $\Phi_v$  与辐射通量的光谱密度  $\Phi_{e\lambda} = d\Phi_e/d\lambda$  [也称为光谱功率分布 (SPD),  $S(\lambda)$ ] 通过 1924CIE 视觉灵敏度函数  $V(\lambda)$  (图 2.1 实线) 相联系

$$\Phi_v = 683(\text{lm/W}) \times \int \Phi_{e\lambda} V(\lambda) d\lambda \quad (2.1)$$

并以流明 (lm) 来度量。这里, 积分在整个可见区进行。由此, 发光强度  $I_v$  是点光源发出的光在单位立体角内的光通量

$$I_v = 683(\text{lm/W}) \times \int I_{e\lambda} V(\lambda) d\lambda \quad (2.2)$$

式中,  $I_{e\lambda} = dI_e/d\lambda$  是辐射强度的光谱密度。发光强度以 cd 或 lm/sr 为单位, cd 是国际单位制 (SI) 的基本单位, 等于一个发射频率  $5.4 \times 10^{14}$  Hz 的单色光、辐射强度 1/683 W/sr 的光源的发光强度。通常, 强度值用小立体角在不同角度位置上测量。为由发光强度得到光通量, 需按特定的步骤把强度在整个球面上进行数值积分 (Hodapp 1997)。

发光强度的概念不能直接应用于不可看作为点光源的众多光源。这样的光

源用亮度来描述，亮度是从面积元  $dA$  发出、在角  $\theta$  方向单位立体角内观察到的光通量

$$L = \frac{d^2 \Phi_v}{d\omega dA \cos\theta} = \frac{dI_v}{dA'} \quad (2.3)$$

式中， $dA'$  是面积元  $dA$  在观察方向  $\theta$  上的投影。亮度用  $\text{cd}/\text{m}^2$  度量。亮度高的光源看起来比亮度低的光源亮。一个不发光但反射的物体明亮程度的视觉可以用它对某个光源发射光的反射来表征。当亮度低于  $10^{-2} \text{cd}/\text{m}^2$  时，暗视觉起主要作用，而若亮度超过  $10 \text{cd}/\text{m}^2$ ，则完全是明视觉。从海平面上看的太阳平均亮度为  $1.6 \times 10^9 \text{cd}/\text{m}^2$ ，而月亮的亮度大约是  $2500 \text{cd}/\text{m}^2$ 。

按照式 (2.1)，波长  $555 \text{nm}$  处  $1 \text{W}$  辐射通量产生  $683 \text{lm}$  光通量。由于视觉灵敏度随着波长偏离  $555 \text{nm}$  而下降，光谱展宽或峰值移动使光通量减小。辐射产生视觉能力的度量是光视效能，单位为  $\text{lm}/\text{W}$

$$K = \frac{\Phi_v}{\Phi_e} = 683 (\text{lm}/\text{W}) \times \frac{\int_{380}^{780} V(\lambda) S(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\infty} S(\lambda) d\lambda} \quad (2.4)$$

如上述例子所表明的，可能的最大效能是  $683 \text{lm}/\text{W}$ 。应注意光视效能表征了辐射的光谱而不是光源。式 (2.4) 也表明，光视效能可以用以任意相对功率单位给出的光谱功率分布来计算。

为了描述光源把能量转换为光的效率，引入了辐射效率和发光效率。无量纲的辐射效率定义为光源将消耗的功率  $P$  转换为辐射通量的能力

$$\eta_e = \frac{\Phi_e}{P} \quad (2.5)$$

辐射效率的可能值在  $0 \sim 1$  范围内。发光效率是光源把消耗的能量转换为视觉的能力

$$\eta_v = \frac{\Phi_v}{P} = \eta_e K \quad (2.6)$$

发光效率以  $\text{lm}/\text{W}$  度量，不应与以相同单位表示的光视效能混淆。

照明实际应用通常涉及到的是照度，照度是入射到一个面上单位面积的光通量

$$E = \frac{d\Phi_v}{dA} = \frac{I_v \cos\theta}{r^2} \quad (2.7)$$

式中， $dA$  是面积元； $\theta$  是入射角； $r$  是点光源到被照射面的距离。照度的测量单位是  $\text{lm}/\text{m}^2$ ，也称为  $\text{lx}$ 。太阳在地球表面产生的照度是  $10^4 \sim 10^5 \text{lx}$ ，因云况而不同；月亮的照度不超过  $0.1 \text{lx}$ 。

照度越高，眼睛分辨细节、低反差以及色调的能力越强。因此，不同活动需要不同的照度级别。表 2.1 给出了北美照明工程协会对不同类型活动推荐的



照度范围。

表 2.1 对不同类型活动推荐的照度范围

活 动 类 型	照度/lx
方向指示和简单的视觉工作(公共空间)	30~100
普通视觉工作(商业、工业和居室应用)	300~1000
专门视觉工作,包括与很小或低反差物件有关的工作	3000~10000

## 2.3 色度学

色度学处理色彩的测量。色感比光感要复杂得多。色彩的数值描述依赖于人类视觉一个非常简单的模型,因此可能与某些主观观察不符。尽管这样,色度学的基本概念,例如三基色值、色坐标、色温和显色性现在都已有明确表述。这些概念对描述光源的照明应用具有十分重要的意义。

用称为三色值的数字表示颜色是基于这样一个实验事实:多数色彩都可以用不超过3种适当的基色(色质)例如红[R]、绿[G]和蓝[B]来模仿。这样就可能用3个色质来规定一种颜色。但是,有些接近单色的色彩不能用3个正的[R]、[G]和[B]配色得到,而需要负值(色彩相减)。这种不便可以通过引入假想的色质[X]、[Y]、[Z]而克服。通过将光谱与标准配色函数 $\bar{x}(\lambda)$ 、 $\bar{y}(\lambda)$ 和 $\bar{z}(\lambda)$ 积分得到3个色值X、Y、Z[即光谱分布 $S(\lambda)$ 表示的色彩中每种色质的量]。标准配色函数是由理想观察者的视觉特性确定的(1931CIE推荐,如图2.2所示)。

$$\begin{aligned} X &= \int \bar{x}(\lambda) S(\lambda) d\lambda \\ Y &= \int \bar{y}(\lambda) S(\lambda) d\lambda \\ Z &= \int \bar{z}(\lambda) S(\lambda) d\lambda \end{aligned} \quad (2.8)$$

1931CIE标准观察者是CIE1931年确立的现代色度学三基色系统的基础。文献(Wyszecki和Stiles 2000)用表列出了不同波长区间内1931CIE配色函数。1931CIE绿色配色函数 $\bar{y}(\lambda)$ 和1921CIE明视觉灵敏度函数 $V(\lambda)$ 完全一致(与图2.1比较)。函数 $\bar{x}(\lambda)$ 、 $\bar{y}(\lambda)$ 和 $\bar{z}(\lambda)$ 是根据窄配色场( $2^\circ$ )确定的,以防止杆状细胞的参与。对于 $4^\circ$ 以上的角度,推荐使用另一组配色函数 $\bar{x}_{10}(\lambda)$ 、 $\bar{y}_{10}(\lambda)$ 和 $\bar{z}_{10}(\lambda)$ (见Wyszecki和Stiles 2000中1964CIE补充的标准观察者)。