

创新型人才培养“十二五”规划教材



半导体照明教程

◆ 方志烈 编著



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

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

TM923.34-43
03

014057578

封面背内

创新型人才培养“十二五”规划教材

半导体照明教程

方志烈 编著



TM923.34-43

03

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING



北航

C1745973

872720410

内 容 简 介

本书围绕半导体照明这一主题，系统地介绍了光度学、色度学的基本知识；发光二极管的材料、器件的机理及其制造技术；LED 器件和灯具的光电参数测试方法，驱动和控制方法，可靠性、寿命的测试和分析，以及各种半导体照明的应用技术，并研讨了半导体照明光品质问题。本书内容系统、全面，通过理论联系实际，深入地阐述了半导体照明材料、器件、灯具及照明应用技术；反映了国内外该领域的科技进步和最新科技成果；论述了半导体照明研发和产业发展的方向。

本书可作为高等院校相关专业的教科书、在职员工的自学教材，也可供半导体照明方面的科研人员和工程技术人员参考。

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

半导体照明教程/方志烈编著. —北京: 电子工业出版社, 2014.9

创新型人才培养“十二五”规划教材

ISBN 978-7-121-23230-5

I. ①半… II. ①方… III. ①半导体发光灯-照明技术-高等学校-教材 IV. ①TM923.34

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 100934 号

策划编辑: 刘海艳

责任编辑: 夏平飞 特约编辑: 郭茂威

印 刷: 三河市双峰印刷装订有限公司

装 订: 三河市双峰印刷装订有限公司

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: 17.5 字数: 442 千字

版 次: 2014 年 9 月第 1 版

印 次: 2014 年 9 月第 1 次印刷

印 数: 3 000 册 定价: 39.80 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。

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。

服务热线: (010) 88258888。

前 言

半导体照明是指用发光二极管作为光源的照明,具有高效、节能、环保、寿命长、易维护等显著优点,是近来全球最具发展前景的高新技术领域之一,也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。半导体照明有着巨大的市场与技术创新空间,对提升传统照明工业、带动相关产业发展,扩大就业、培育新的经济增长点,意义重大。

自2003年6月启动国家半导体照明工程以来,经过十年的拼搏和奋斗,2013年半导体照明产业产值已达2576亿元,企业超过一万家,初具规模并形成了完整的产业链。我国已有一批年销售过亿元的企业和数家过10亿元的企业。沪深股市中业务涉及半导体照明的公司已有70余家。功率LED产品从10lm/W发展到目前的140lm/W。MOCVD关键生产设备已有1090台,有五六家公司研制成功MOCVD规模生产设备。芯片国产化率达到75%,封装技术接近国际水平,LED照明应用技术具有一定优势,全系列LED取代灯进入国内外照明市场,灯具光效达90~120lm/W,国际市场上60%~70%的LED照明应用产品由我国制造,我国已成为全球LED封装和应用产品重要的生产和出口基地。所有这些展现给大家的是一幅幅春意盎然、朝气蓬勃的早春景象。

当然,这个春天还只是早春二月,十年的战绩将激励我们奋发前进,做大做强。我们将跃进阳春三月,再创造出一个四月艳阳天,实现半导体照明的中国梦,从胜利走向辉煌。

未来的五年,半导体照明产品将开始进入商用市场的成熟期和家用市场的黄金期。到2018年前后,半导体照明产品的市场渗透率有望超过85%,整体上进入成熟期。LED取代灯完成取代阶段,而类似于面板灯等LED创新型灯具、智能型LED灯具和智能控制半导体照明系统将广泛使用,更加节能并美化人们的生活。一二十家掌握核心技术、拥有自主知识产权和知名品牌的龙头企业将应运而生。半导体照明万亿元产业将在祖国的大地上,就像那东方的太阳冉冉升起,照亮华夏,照耀世界。

半导体照明产业的快速发展需要大量的专业技术人才,业内员工也需自学进修,对专业教材的需求尤为迫切。电子工业出版社副总编辑赵丽松建议我编著一本半导体照明的专业教材,经商定取名《半导体照明教程》。本书于每章之后列有思考题,书后附录给出了思考题答案。

本书内容系统、全面,理论联系实际,深入地阐述了半导体照明材料、器件、灯具及照明应用技术;反映了国内外该领域的科技进步和最新科技成果;论述了半导体照明研发和产业发展方向。

本书可作为高等院校相关专业的教科书、业内员工的自学教材,也可供半导体照明方面的科研人员和工程技术人员参考。

编者对电子工业出版社的建议和鼎力支持深表感谢!限于时间仓促,书中不当和欠缺之处,请予批评指正。

编著者

2014年6月于上海

反侵权盗版声明

电子工业出版社依法对本作品享有专有出版权。任何未经权利人书面许可，复制、销售或通过信息网络传播本作品的行为；歪曲、篡改、剽窃本作品的行为，均违反《中华人民共和国著作权法》，其行为人应承担相应的民事责任和行政责任，构成犯罪的，将被依法追究刑事责任。

为了维护市场秩序，保护权利人的合法权益，本社将依法查处和打击侵权盗版的单位和个人。欢迎社会各界人士积极举报侵权盗版行为，本社将奖励举报有功人员，并保证举报人的信息不被泄露。

举报电话：(010) 88254396；(010) 88258888

传 真：(010) 88254397

E-mail: dbqq@phei.com.cn

通信地址：北京市海淀区万寿路173信箱

电子工业出版社总编办公室

邮 编：100036

目 录

| | |
|-------------------------|----|
| 前言 | 1 |
| 第1章 光 视觉 颜色 | 1 |
| 1.1 光 | 1 |
| 1.1.1 光的本质 | 1 |
| 1.1.2 光的产生和传播 | 2 |
| 1.1.3 人眼的光谱灵敏度 | 5 |
| 1.1.4 光度学参数 | 5 |
| 1.2 视觉 | 6 |
| 1.2.1 作为光学系统的人眼 | 6 |
| 1.2.2 视觉的特征与功能 | 7 |
| 1.3 颜色 | 8 |
| 1.3.1 颜色的性质 | 8 |
| 1.3.2 国际照明委员会色度学系统 | 9 |
| 1.3.3 色度学及其参数 | 10 |
| 第2章 光源 | 12 |
| 2.1 自然光源 | 12 |
| 2.1.1 太阳 | 12 |
| 2.1.2 月亮和行星 | 12 |
| 2.2 人工光源 | 13 |
| 2.2.1 人工光源的发明和发展 | 13 |
| 2.2.2 白炽灯 | 13 |
| 2.2.3 卤钨灯 | 14 |
| 2.2.4 荧光灯 | 14 |
| 2.2.5 低压钠灯 | 16 |
| 2.2.6 高压放电灯 | 17 |
| 2.2.7 无电极放电灯 | 18 |
| 2.2.8 发光二极管 | 19 |
| 2.3 照明的经济核算 | 20 |
| 第3章 半导体发光材料晶体导论 | 22 |
| 3.1 晶体结构 | 22 |
| 3.1.1 空间点阵 | 22 |
| 3.1.2 晶面与晶向 | 23 |
| 3.1.3 闪锌矿结构、金刚石结构和纤锌矿结构 | 24 |

| | | |
|--------------|---------------------|-----------|
| 3.1.4 | 晶体缺陷及其对发光的影响 | 25 |
| 3.2 | 能带结构 | 27 |
| 3.3 | 半导体晶体材料的电学性质 | 29 |
| 3.3.1 | 费米能级和载流子 | 29 |
| 3.3.2 | 载流子的漂移和迁移率 | 30 |
| 3.3.3 | 电阻率的载流子浓度 | 30 |
| 3.3.4 | 载流子寿命 | 30 |
| 3.4 | 半导体发光材料的条件 | 31 |
| 3.4.1 | 带隙宽度合适 | 31 |
| 3.4.2 | 可获得电导率高的 P 型和 N 型晶体 | 31 |
| 3.4.3 | 可获得完整性好的优质晶体 | 31 |
| 3.4.4 | 发光复合概率大 | 32 |
| 第 4 章 | 半导体的激发与发光 | 34 |
| 4.1 | PN 结及其特性 | 34 |
| 4.1.1 | 理想的 PN 结 | 34 |
| 4.1.2 | 实际的 PN 结 | 37 |
| 4.2 | 注入载流子的复合 | 38 |
| 4.2.1 | 复合的种类 | 38 |
| 4.2.2 | 辐射型复合 | 38 |
| 4.2.3 | 非辐射型复合 | 40 |
| 4.2.4 | 辐射复合与非辐射复合之间的竞争 | 41 |
| 4.3 | 异质结构和量子阱 | 41 |
| 4.3.1 | 异质结构 | 41 |
| 4.3.2 | 量子阱 | 43 |
| 第 5 章 | 半导体发光材料体系 | 46 |
| 5.1 | 砷化镓 | 46 |
| 5.2 | 磷化镓 | 47 |
| 5.3 | 磷砷化镓 | 49 |
| 5.4 | 镓铝砷 | 51 |
| 5.5 | 铝镓铟磷 | 52 |
| 5.6 | 铟镓氮 | 52 |
| 第 6 章 | 半导体照明光源的发展 | 56 |
| 6.1 | 21 世纪新光源——半导体照明光源 | 56 |
| 6.2 | 发光二极管的发展 | 56 |
| 6.3 | 发光二极管材料生长方法 | 59 |
| 6.4 | 高亮度发光二极管芯片结构 | 60 |
| 6.5 | 发光二极管器件结构进展 | 62 |
| 6.6 | 照明用 LED 的特征参数和近期发展 | 62 |
| 第 7 章 | 半导体发光材料外延生长 | 67 |

| | | |
|-------------------------|----------------------|------------|
| 7.1 | 半导体发光材料外延生长方法 | 67 |
| 7.2 | 磷砷化镓氢化物气相外延生长 (HVPE) | 67 |
| 7.3 | 磷化镓的液相外延 | 68 |
| 7.4 | 镓铝砷的液相外延 | 70 |
| 7.5 | 铝镓铟磷 MOCVD | 70 |
| 7.6 | 铟镓氮 MOCVD | 77 |
| 7.6.1 | GaN PN 结 LED | 78 |
| 7.6.2 | 双气流法 | 78 |
| 7.6.3 | N_2 中热退火制 P 型 GaN | 79 |
| 7.6.4 | 器件生长 | 79 |
| 7.6.5 | 重要技术问题 | 81 |
| 第 8 章 LED 芯片制备技术 | | 83 |
| 8.1 | 光刻技术 | 83 |
| 8.2 | 氮化硅生长 | 83 |
| 8.3 | 扩散 | 83 |
| 8.4 | 欧姆接触电极 | 84 |
| 8.5 | 氧化铟锡 (ITO) 透明电极 | 86 |
| 8.6 | 表面粗化 | 87 |
| 8.7 | 微透镜技术 | 88 |
| 8.8 | 光子晶体 | 88 |
| 8.9 | 激光剥离 (LLO) | 89 |
| 8.10 | 倒装芯片技术 | 90 |
| 8.11 | 垂直结构芯片技术 | 90 |
| 8.12 | 芯片切割 | 92 |
| 8.13 | 三维芯片 | 92 |
| 第 9 章 白光发光二极管 | | 95 |
| 9.1 | 新世纪光源的研制目标 | 95 |
| 9.2 | 人造白光的最佳化 | 95 |
| 9.3 | 荧光粉转换白光 LED | 98 |
| 9.4 | 多芯片白光 LED | 102 |
| 第 10 章 LED 封装技术 | | 106 |
| 10.1 | LED 器件的设计 | 106 |
| 10.1.1 | 设计原则 | 106 |
| 10.1.2 | 电学设计 | 106 |
| 10.1.3 | 热学设计 | 107 |
| 10.1.4 | 光学设计 | 108 |
| 10.1.5 | 视觉因素 | 110 |
| 10.2 | LED 封装技术 | 112 |
| 10.2.1 | 小功率 LED 封装 | 112 |

| | | |
|-------------------------|--------------------|------------|
| 10.2.2 | SMD LED 的封装 | 114 |
| 10.2.3 | 大电流 LED 的封装 | 115 |
| 10.2.4 | 功率 LED 的封装 | 116 |
| 10.2.5 | 功率 LED 组件 | 122 |
| 10.2.6 | 铜铟氮类 LED 的防静电措施 | 123 |
| 第 11 章 发光二极管的测试 | | 125 |
| 11.1 | 发光器件的效率 | 125 |
| 11.1.1 | 发光效率 | 125 |
| 11.1.2 | 功率效率 | 125 |
| 11.1.3 | 量子效率 | 125 |
| 11.2 | 发电器件的电学参数 | 126 |
| 11.2.1 | 伏安特性 | 126 |
| 11.2.2 | 总电容 | 127 |
| 11.3 | 光电响应参数 | 128 |
| 11.4 | 光度学参数 | 128 |
| 11.4.1 | 法向光强 I_0 的测定 | 128 |
| 11.4.2 | 发光强度角分布 (半强度角和偏差角) | 129 |
| 11.4.3 | 总光通量的测量 | 130 |
| 11.4.4 | 量值传递 | 132 |
| 11.5 | 色度学参数 | 133 |
| 11.5.1 | 光谱分布曲线 | 133 |
| 11.5.2 | 色度坐标测量 | 134 |
| 11.5.3 | 显色指数 | 134 |
| 11.5.4 | 色温和相关色温测量 | 135 |
| 11.6 | 热学参数 (结温、热阻) | 135 |
| 11.7 | 静电耐受性 | 136 |
| 第 12 章 发光二极管的可靠性 | | 138 |
| 12.1 | LED 可靠性概念 | 138 |
| 12.1.1 | 可靠性的含义 | 138 |
| 12.1.2 | 可靠度的定义 | 139 |
| 12.1.3 | LED 可靠性的相关概念 | 139 |
| 12.2 | LED 的失效分析 | 141 |
| 12.2.1 | 芯片的退化 | 141 |
| 12.2.2 | 环氧系塑料的寿命分析 | 143 |
| 12.2.3 | LED 器件的寿命分析 | 144 |
| 12.2.4 | 荧光粉的退化 | 145 |
| 12.3 | 可靠性试验 | 146 |
| 12.3.1 | 小功率 LED 环境试验 | 147 |
| 12.3.2 | 功率 LED 环境试验 | 148 |

| | | |
|-----------------------------|----------------------|------------|
| 12.4 | 寿命试验 | 149 |
| 12.4.1 | 小功率 LED 的寿命试验 | 149 |
| 12.4.2 | 功率 LED (白光) 长期工作寿命试验 | 149 |
| 12.4.3 | 功率 LED 加速寿命试验 | 150 |
| 12.5 | 可靠性筛选 | 152 |
| 12.5.1 | 功率老化 | 152 |
| 12.5.2 | 高温老化 | 152 |
| 12.5.3 | 湿度试验 | 152 |
| 12.5.4 | 高低温循环 | 152 |
| 12.5.5 | 其他项目的选用 | 153 |
| 12.6 | 例行试验和鉴定验收试验 | 153 |
| 12.6.1 | 例行试验 | 153 |
| 12.6.2 | 鉴定验收试验 | 153 |
| 第 13 章 半导体照明驱动与控制 | | 155 |
| 13.1 | LED 驱动技术 | 155 |
| 13.1.1 | LED 的电学性能特点 | 155 |
| 13.1.2 | 电源驱动方案 | 155 |
| 13.1.3 | 驱动电路基本方案 | 156 |
| 13.1.4 | LED 驱动器的特性 | 160 |
| 13.1.5 | LED 与驱动器的匹配 | 161 |
| 13.2 | LED 驱动器 | 165 |
| 13.2.1 | 电容降压式 LED 驱动器 | 165 |
| 13.2.2 | 电感式 LED 驱动器 | 165 |
| 13.2.3 | 电荷泵式 LED 驱动器 | 165 |
| 13.2.4 | LED 恒流驱动器 | 167 |
| 13.2.5 | 高压线性恒流驱动器 | 167 |
| 13.3 | LED 集成驱动电路资料摘编 | 168 |
| 13.4 | 控制技术 | 170 |
| 13.4.1 | 调光 | 170 |
| 13.4.2 | 调色 | 170 |
| 13.4.3 | 调色温 | 171 |
| 13.4.4 | 智能照明 | 172 |
| 第 14 章 半导体照明应用——景观照明 | | 173 |
| 14.1 | 通用照明的范围和分类 | 173 |
| 14.2 | 半导体照明应用产品开发原则 | 173 |
| 14.2.1 | 要从 LED 的优点出发开发应用产品 | 174 |
| 14.2.2 | 应用产品市场启动的判据——照明成本 | 175 |
| 14.2.3 | 应用产品的技术关键是散热 | 175 |
| 14.2.4 | 遵循功率由低到高、技术由易到难的原则 | 175 |

| | | |
|-----------------------------|--------------------|------------|
| 14.3 | 照明灯具通则 | 176 |
| 14.3.1 | 反射器的基本形式 | 176 |
| 14.3.2 | 折射器的基本形式 | 177 |
| 14.3.3 | 灯具的分类 | 178 |
| 14.4 | 景观照明 | 181 |
| 14.4.1 | 景观照明的功能作用 | 181 |
| 14.4.2 | 光源选择以 LED 为佳 | 183 |
| 14.4.3 | LED 景观灯具 | 183 |
| 14.4.4 | LED 景观照明典型工程 | 190 |
| 14.4.5 | 景观照明规范化 | 194 |
| 第 15 章 半导体照明应用——道路照明 | | 196 |
| 15.1 | 道路照明质量指标 | 196 |
| 15.1.1 | 路面的平均亮度 | 196 |
| 15.1.2 | 路面的亮度均匀度 | 196 |
| 15.1.3 | 眩光控制水平 | 197 |
| 15.1.4 | 环境照明系数 | 199 |
| 15.1.5 | 视觉引导性 | 199 |
| 15.2 | 道路照明的标准 | 199 |
| 15.3 | 道路照明方式 | 202 |
| 15.3.1 | 灯杆照明 | 202 |
| 15.3.2 | 高杆照明 | 203 |
| 15.3.3 | 悬索照明 | 203 |
| 15.3.4 | 栏杆照明 | 203 |
| 15.4 | 道路照明的现场测量 | 204 |
| 15.5 | 传统道路照明光源使用现状 | 205 |
| 15.6 | LED 路灯是半导体照明中冒出的黑马 | 206 |
| 15.7 | LED 路灯技术 | 208 |
| 15.7.1 | 光学设计 | 208 |
| 15.7.2 | 散热设计 | 208 |
| 15.7.3 | LED 路灯的驱动电源 | 209 |
| 15.8 | LED 太阳能路灯 | 210 |
| 15.9 | LED 隧道灯 | 211 |
| 15.10 | 光源效率和照明系统整体效率 | 212 |
| 第 16 章 半导体照明应用——室内照明 | | 214 |
| 16.1 | 办公室照明 | 214 |
| 16.1.1 | 集中办公区 | 214 |
| 16.1.2 | 单元办公区 | 215 |
| 16.1.3 | 会议办公区 | 215 |
| 16.1.4 | 综合办公区 | 216 |

| | | |
|---------------|------------------------|------------|
| 16.1.5 | 公共区域 | 216 |
| 16.1.6 | 办公室照明的发展趋势 | 216 |
| 16.1.7 | LED 照明在办公室的应用案例 | 218 |
| 16.2 | 商场照明 | 219 |
| 16.2.1 | 超级市场照明 | 219 |
| 16.2.2 | 百货商店照明 | 219 |
| 16.2.3 | 专卖店和旗舰店照明 | 221 |
| 16.3 | 工厂车间照明 | 222 |
| 16.4 | 住宅照明 | 223 |
| 16.4.1 | 住宅照明设计 | 224 |
| 16.4.2 | 住宅照明的功能和要求 | 224 |
| 16.5 | 学校照明 | 225 |
| 16.6 | 医院照明 | 226 |
| 16.7 | 室内照明 LED 光源和灯具 | 227 |
| 第 17 章 | 半导体照明的光品质 | 234 |
| 17.1 | 色纯度 | 234 |
| 17.2 | 显色性 | 234 |
| 17.3 | 舒适度 | 237 |
| 17.4 | LED 色温 | 238 |
| 17.5 | 智能化 LED 生物节律照明 | 239 |
| 第 18 章 | 半导体照明技术、市场现状和展望 | 240 |
| 18.1 | 材料 | 240 |
| 18.1.1 | 衬底 | 240 |
| 18.1.2 | 外延 | 241 |
| 18.1.3 | 芯片技术 | 242 |
| 18.2 | 制造和测试设备 | 243 |
| 18.3 | LED 器件和组件 | 244 |
| 18.4 | 照明灯具系统 | 245 |
| 18.5 | 智能控制 LED 照明工程系统 | 247 |
| 18.6 | 中国半导体照明产业 | 247 |
| 18.7 | 全球半导体照明产业发展趋势 | 248 |
| 18.8 | 全球半导体照明产业展望 | 249 |
| 18.9 | 有机发光二极管进展 | 249 |
| 18.10 | LED 的非视觉应用进展 | 251 |
| 附录 A | 思考题答案 | 254 |
| 参考文献 | | 266 |

第 1 章 光 视觉 颜色

1.1 光

1.1.1 光的本质

光的波粒二重性。光的波动性，是指光是一种电磁波。光是电磁波辐射的一部分，而可见光仅指波长为 380 ~ 780nm 的光，如图 1-1 所示。

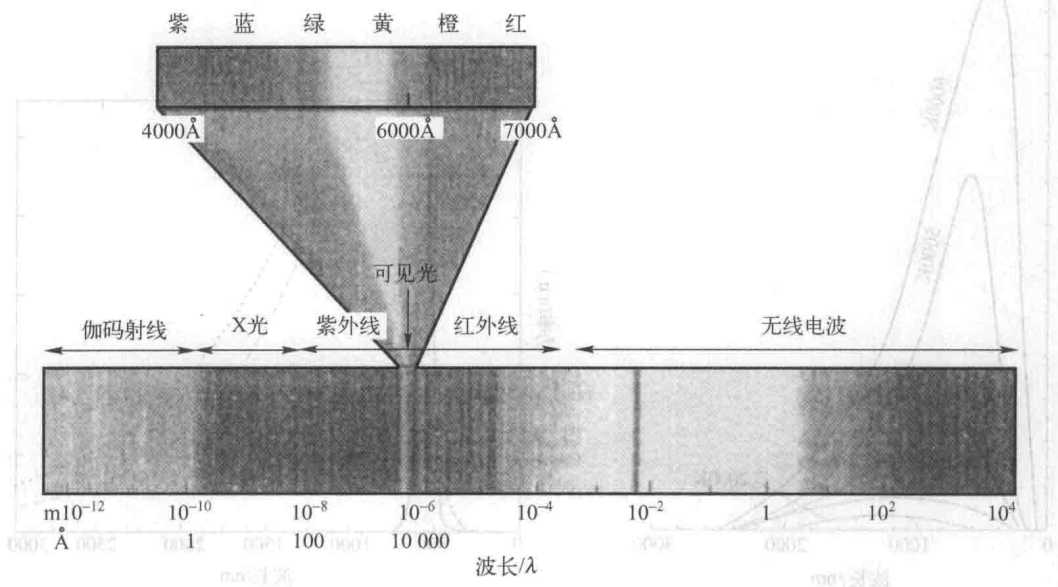


图 1-1

光的微粒性是指光束是微粒流，这些微粒就是光子。光子的运动速度就是光速。不同波长的光，具有不同的能量，即由不同能量的光子组成。光子具有的能量 E 正比于光的频率：

$$E = h\nu \tag{1-1}$$

光子所具有的能量 $h\nu$ 是频率为 ν 的光所具有的能量最小单位，不能再分割了，故光子又称光量子。

在光和其他物质相互作用时，能量的交换是按 $h\nu$ 的形式一份一份地进行的，即能量是不连续的。

1.1.2 光的产生和传播

1.1.2.1 光的产生

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。在某一温度下，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：

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

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 为波耳兹曼常数 (J/K)； T 是绝对温度 (K)。

不同温度黑体辐射分布如图 1-2 所示。

黑体及钨丝发热体的光谱如图 1-3 所示。

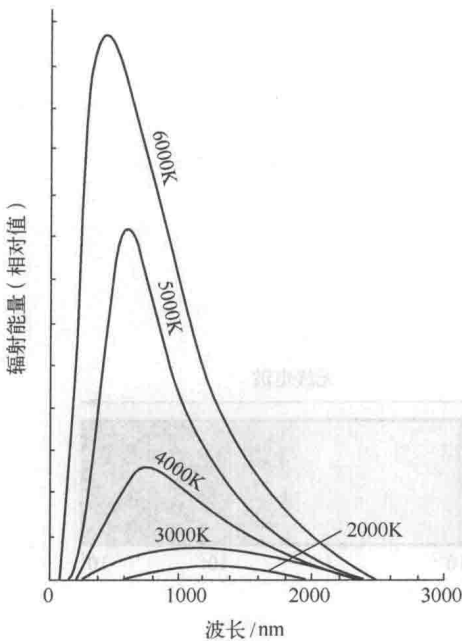


图 1-2 不同温度黑体辐射的能量分布

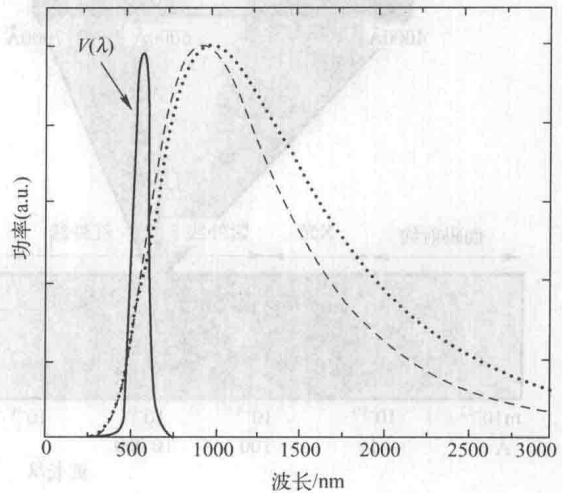


图 1-3 黑体 (点虚线) 及钨丝发热体 (短虚线) 在 3000K 时的光谱

发光就是其他任何种类能量转换成光能的过程。按激发方式不同可分为如下几类：

- (1) 生物发光：萤火虫、发光细菌等的生物发光。
- (2) 化学反应：由化学反应直接引起的发光，如黄磷自燃发光。
- (3) 光致发光：由光、紫外光等激发而引起的发光，如荧光灯。
- (4) 阴极射线发光：由电子束激发荧光物质发光，如 CRT。
- (5) 燃烧发光：碱金属和碱土金属及其盐类在火中发出特有的光，又称焰色反应，如钠离子的黄光。
- (6) 电致发光：

- 气体或伴随气体放电而发光，如霓虹灯。
- 加电场于硫化锌等粉末产生发光，如场致发光板。
- III - V 族半导体 PN 结注入载流子产生电子、空穴复合发光即 LED。小分子或聚合物有机物半导体 PN 结发光即 OLED。

激发是一个能量转移过程，发射光的波长决定于能量差

$$\Delta E = h\nu = hc/\lambda \quad (1-3)$$

1.1.2.2 光的传播

光在真空中以 $3 \times 10^8 \text{ m/s}$ 的速度沿直线传播。

当通过某种媒质时，例如玻璃，其传播速度就会减慢。光在真空中的速度和在媒质中的速度的比值就称为该媒质的折射率。

1. 光的反射

(1) 镜面反射。又称规则反射，是指在光滑的界面上产生的反射。入射光、反射光、法线都在同一平面上，入射角等于反射角。

(2) 散反射。当光线入射到经散射处理的铝板或毛面白漆涂层时，反射光向各个不同方向散开，但总的方向是一致的，如图 1-4 所示。

(3) 漫反射。光线从某一个方面入射到粗糙表面时，被分散到许多方向，符合朗伯余弦定律，如图 1-5 所示。

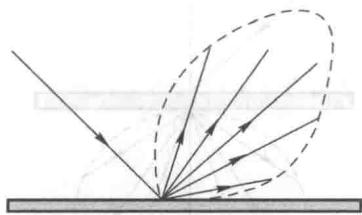


图 1-4 散反射

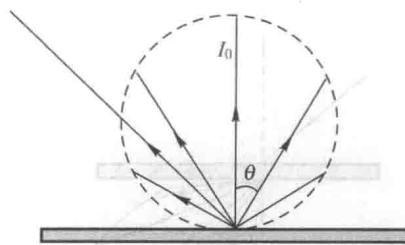


图 1-5 漫反射

(4) 混合反射。当光线入射到瓷釉或高光泽漆层上，规则反射和漫反射兼有，称其为混合反射。

2. 光的折射

(1) 折射。如果入射光线处在折射率为 n_1 的媒质中，且和法线的夹角是 θ_1 ，折射光线处在折射率为 n_2 的媒质中，且和法线的夹角是 θ_2 ，则斯涅尔 (Snell) 定律为

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \quad (1-4)$$

(2) 全反射。当光线从高折射率媒质进入到低折射率媒质，例如从玻璃到空气时，只有当入射角 θ_1 小于临界角时，才会有折射线 (见图 1-6)，其临界角即相应于上式中 $\sin^{-1}(n_2/n_1)$ 。例如，对折射率为 1.5 的玻璃，其临界角为 $\theta_1 = 41^\circ 49'$ 。如果光的入射角大于临界角，那就没有折射光线，入射光线全被反射了。这种现象称为全反射。

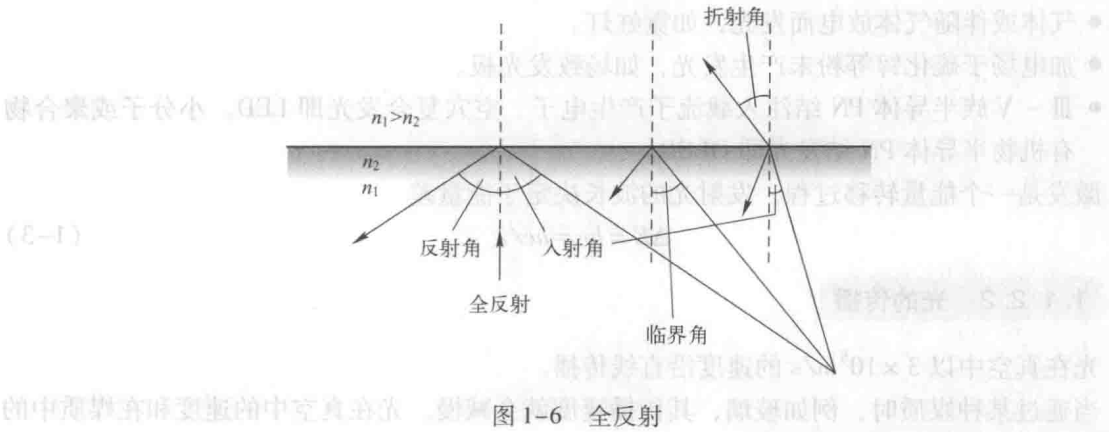


图 1-6 全反射

3. 光的透射

(1) 规则透射。当光照到透明材料上时，透射光符合斯涅尔定律。对平行材料方向相同，略有偏移，对非平行线材料如棱镜，则因折射改变方向。

(2) 散透射。光线穿过透射材料如磨砂玻璃时，在透射方向上的发光强度较大，而其他方向较小，亦称定向扩散透射，如图 1-7 所示。

(3) 漫透射。光线照到散射性好的透射材料上时如乳白玻璃等，透射光服从朗伯定律，发光强度按余弦分布，如图 1-8 所示。

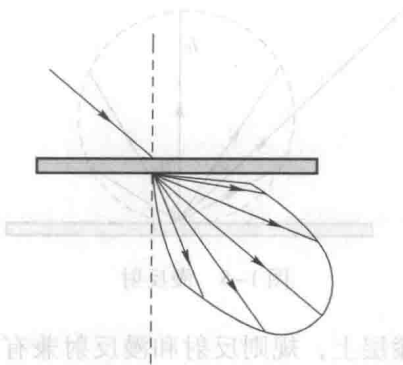


图 1-7 散透射

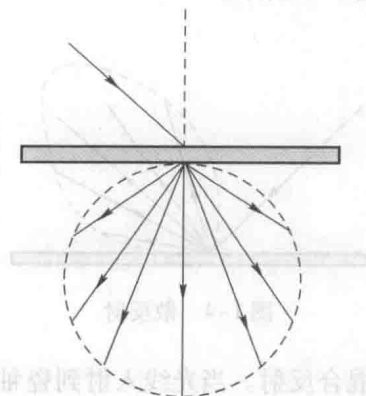


图 1-8 漫透射

(4) 混合透射。光线照到透射材料上，其透射特性介于规则透射与漫透射（或散透射）之间的情况，称混合透射。

4. 光的吸收

光的吸收是由于光能转换成能量的其他形态时引起的。如果介质是均匀的，则一定波长的平行光束穿过时，光强的损失按指数衰减：

$$I = I_0 \exp(-\alpha x) \quad (1-5)$$

式中， I_0 为光束的初始光强， I 为光束在介质中通过 x 距离后的光强， α 为和波长有关的材料吸收率。

1.1.3 人眼的光谱灵敏度

人眼在可见光范围内的视觉灵敏度是不相同的(见图1-9)。另外,它还随环境亮度的改变而变化。图中右面曲线是明视觉($B \geq 10 \text{cd/m}^2$)条件下的灵敏度曲线,左面曲线是暗视觉($B \leq 10^{-3} \text{cd/m}^2$)条件下的灵敏度曲线,相对视见度数值可通过查表获得。

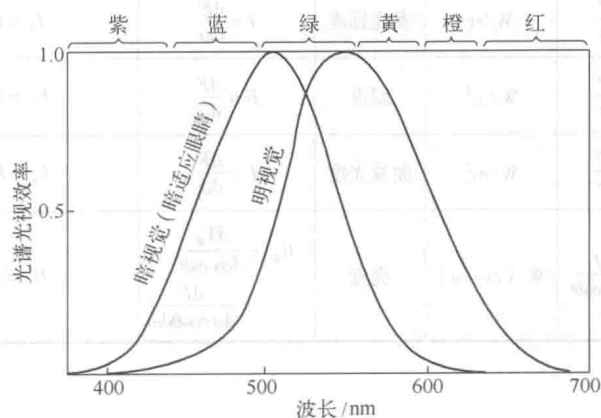


图1-9 人眼的相对光谱灵敏度

1. 明视觉

在明视觉亮度条件下,最大的视觉响应在555nm处,视见度峰值达680lm/W,并于1924年得到国际公认。在明视觉条件下,正常人的眼睛都能感受到颜色。

2. 暗视觉

在暗视觉亮度条件下,最大的视觉响应在507nm处,蓝移了48nm,且峰值升至1725lm/W,达到2.54倍。在暗视觉条件下,世界是无色的。

3. 中间视觉

位于明、暗视觉亮度条件之间的都是中间视觉亮度条件,且具有从明到暗峰值不断提高,而同时向短波长方向移动的特点。从图1-9上看则应是两条曲线之间的一系列曲线。

1.1.4 光度学参数

辐射度学量是物理量。光度学量还与人的视见度有关,所以是生物物理量。二者之间差一个视见度 K_λ 值。

辐射度学量与光度学量的对应关系如表1-1所示。

表1-1 辐射度学和光度学参数的对应关系

| 辐射度学量 | | | 光度学量 | | | |
|-------|------|------|------|------|-----------------------------------|------|
| 量 | 符号,式 | 单位名称 | 量 | 符号,式 | 与辐射量的关系 | 单位名称 |
| 辐射能 | U | J | 光能 | Q | $Q_\lambda = K_\lambda U_\lambda$ | lm·s |