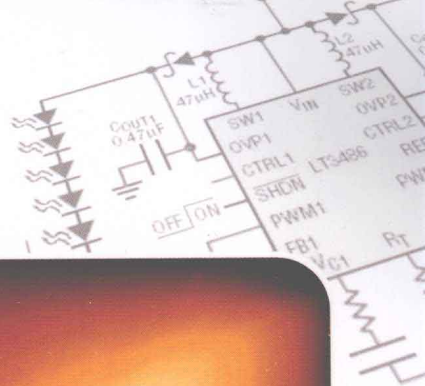


**LED** 应用技术系列书



# 太阳能LED 照明技术与工程设计

周志敏 纪爱华 等编著



中国电力出版社  
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

LED 应用技术系列书

目录

第一章 太阳能LED照明技术概述 1  
第一节 太阳能LED照明技术的发展 1  
第二节 太阳能LED照明技术的组成 2  
第三节 太阳能LED照明技术的应用 3  
第二章 太阳能LED照明系统设计 4  
第一节 系统设计的基本原则 4  
第二节 系统设计的一般步骤 5  
第三节 系统设计的具体内容 6  
第三章 太阳能LED照明工程实施 7  
第一节 工程实施前的准备工作 7  
第二节 工程实施过程中的注意事项 8  
第三节 工程实施后的验收与维护 9

# 太阳能LED 照明技术与工程设计

周志敏 纪爱华 等编著



中国电力出版社  
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

太阳能是一种非常理想的清洁能源，近年来由于人们对能源、环境问题的日益关注，太阳能的应用与普及越来越受到人们的重视，应用领域也日益广泛。但是，在目前太阳能应用技术的水平下，太阳能技术作为能源，其高成本、低效率问题不容回避，特别是在单体照明应用中，如不与LED照明技术相结合，仅按照常规设计太阳能照明系统，往往要面对系统变换效率低及经济效益不佳等问题。这与LED具有低能耗、直流工作等优势有关，因此LED无疑成为配合太阳能照明光源的理想产品。就我国目前的技术和政策而言，太阳能LED照明系统应是最有希望快速普及应用太阳能光伏技术的领域，其潜在的市场使太阳能LED照明系统显示出了强大的发展潜力。

我国政府一直把研究开发太阳能技术、LED照明技术列入国家科技攻关计划，这也大大推动了我国太阳能产业和LED照明技术的发展。进入21世纪，我国太阳能光伏技术和LED照明技术在研发、商业化生产、市场开拓方面都获得了长足的发展，现已成为高速、稳定发展的新兴产业。随着我国绿色照明工程的组织实施，必将促进太阳能LED照明技术的进一步创新和发展。

本书正是在这样的形势下编写而成。编写上把太阳能LED照明系统的设计与工程应用技术有机地结合起来，在保证科学性的同时，尽量做到有针对性和实用性，力求做到通俗易懂且结合实际工程应用，以便读者更好地掌握太阳能LED照明系统的设计方法和最新工程应用技术。读者可以此书为桥梁，系统、全面地了解和掌握太阳能LED照明系统的设计方法、安装调试技能等，并将其灵活地运用到工作实践中。

参加本书编写工作的有周志敏、纪爱华、周纪海、纪达奇、刘建秀、顾发娥、纪达安、纪和平、刘淑芬等，本书在写作过程中无论在资料的收集和技术信息交流上，都得到了国内外的专业学者和同行的大力支持，在此一并表示衷心的感谢。

由于时间仓促，以及作者水平有限，书中不当之处在所难免，敬请读者批评指正。

编者



前言

|                               |    |
|-------------------------------|----|
| 第1章 太阳能LED照明基础知识 .....        | 1  |
| 1.1 光的基本知识 .....              | 1  |
| 1.1.1 光的特性 .....              | 1  |
| 1.1.2 光的质量 .....              | 6  |
| 1.2 光电技术的半导体基础 .....          | 9  |
| 1.2.1 半导体的特性 .....            | 9  |
| 1.2.2 半导体的导电机理 .....          | 11 |
| 1.3 太阳能电池原理及特性 .....          | 13 |
| 1.3.1 太阳能电池原理 .....           | 13 |
| 1.3.2 太阳能电池的应用特性 .....        | 18 |
| 1.4 LED 固体照明技术 .....          | 19 |
| 1.4.1 LED 的结构、发光原理及发光效率 ..... | 19 |
| 1.4.2 LED 的主要参数与特性 .....      | 23 |
| 1.5 太阳能LED照明技术 .....          | 30 |
| 1.5.1 太阳能及光伏照明系统 .....        | 30 |
| 1.5.2 太阳能LED照明系统 .....        | 33 |
| 第2章 太阳能电池 .....               | 40 |
| 2.1 太阳能电池的发展及特性 .....         | 40 |
| 2.1.1 太阳能电池的发展 .....          | 40 |
| 2.1.2 太阳能电池的特性 .....          | 44 |
| 2.2 太阳能电池的分类及组件 .....         | 47 |
| 2.2.1 太阳能电池的分类 .....          | 47 |
| 2.2.2 太阳能电池组件 .....           | 54 |
| 2.3 太阳能电池方阵设计 .....           | 60 |
| 2.3.1 太阳能电池方阵容量设计 .....       | 60 |
| 2.3.2 太阳能电池方阵设计中注意事项 .....    | 66 |
| 第3章 铅酸蓄电池 .....               | 70 |
| 3.1 铅酸蓄电池基础知识 .....           | 70 |
| 3.1.1 铅酸蓄电池的分类及技术指标 .....     | 70 |
| 3.1.2 铅酸蓄电池的工作原理 .....        | 75 |

|                                         |            |
|-----------------------------------------|------------|
| 3.1.3 VRLA 铅酸蓄电池的充放电特性 .....            | 78         |
| 3.2 太阳能用胶体铅酸蓄电池 .....                   | 81         |
| 3.2.1 胶体铅酸蓄电池 .....                     | 81         |
| 3.2.2 胶体铅酸蓄电池结构及优缺点 .....               | 82         |
| 3.2.3 胶体电解质的特性及结构 .....                 | 83         |
| 3.2.4 两类 VRLA 蓄电池的比较 .....              | 85         |
| 3.3 VRLA 蓄电池组的均匀性及一致性 .....             | 88         |
| 3.3.1 VRLA 蓄电池组的均匀性 .....               | 88         |
| 3.3.2 VRLA 蓄电池容量的一致性 .....              | 91         |
| 3.4 太阳能光伏系统蓄电池组设计及性能参数 .....            | 93         |
| 3.4.1 蓄电池组设计 .....                      | 93         |
| 3.4.2 太阳能专用蓄电池的性能参数 .....               | 98         |
| <b>第 4 章 光伏发电系统控制器 .....</b>            | <b>103</b> |
| 4.1 VRLA 蓄电池充放电特性 .....                 | 103        |
| 4.1.1 VRLA 蓄电池的充电特性 .....               | 103        |
| 4.1.2 VRLA 蓄电池的放电特性 .....               | 107        |
| 4.2 蓄电池充放电控制技术 .....                    | 108        |
| 4.2.1 蓄电池充电技术 .....                     | 108        |
| 4.2.2 蓄电池充电控制技术 .....                   | 109        |
| 4.2.3 蓄电池温度补偿技术 .....                   | 111        |
| 4.2.4 基于 UC3906 设计的蓄电池充电器 .....         | 112        |
| 4.3 太阳能 LED 照明系统控制器 .....               | 115        |
| 4.3.1 控制器功能及选择 .....                    | 115        |
| 4.3.2 控制器工作原理 .....                     | 116        |
| 4.3.3 控制器控制策略 .....                     | 120        |
| 4.4 太阳能 LED 路灯控制器 .....                 | 126        |
| 4.4.1 太阳能 LED 路灯控制器工作原理及功能 .....        | 126        |
| 4.4.2 EPDC 型太阳能 LED 路灯双路输出控制器 .....     | 129        |
| 4.4.3 EPRC10-ST-MT 型太阳能 LED 路灯控制器 ..... | 132        |
| 4.4.4 MPPT-10 型太阳能 LED 路灯控制器 .....      | 135        |
| 4.4.5 CLP12-10A/ST 型太阳能 LED 路灯控制器 ..... | 137        |
| <b>第 5 章 LED 照明灯具结构及设计 .....</b>        | <b>139</b> |
| 5.1 LED 照明技术及灯具结构 .....                 | 139        |
| 5.1.1 LED 照明技术 .....                    | 139        |
| 5.1.2 LED 照明灯具结构 .....                  | 144        |
| 5.2 LED 灯具设计 .....                      | 162        |
| 5.2.1 LED 灯具设计程序 .....                  | 162        |
| 5.2.2 LED 道路照明灯具设计 .....                | 168        |

|                                     |     |
|-------------------------------------|-----|
| <b>第 6 章 太阳能 LED 照明系统工程设计</b> ..... | 187 |
| 6.1 太阳能 LED 照明系统设计 .....            | 187 |
| 6.1.1 太阳能 LED 照明系统设计原则 .....        | 187 |
| 6.1.2 太阳能 LED 照明系统设计方法 .....        | 190 |
| 6.2 太阳能 LED 草坪灯设计 .....             | 192 |
| 6.2.1 太阳能 LED 草坪灯组成及特点 .....        | 193 |
| 6.2.2 太阳能 LED 草坪灯设计实例 .....         | 193 |
| 6.3 太阳能 LED 路灯、庭院灯设计 .....          | 196 |
| 6.3.1 太阳能 LED 路灯、庭院灯设计条件 .....      | 196 |
| 6.3.2 太阳能 LED 路灯设计实例 .....          | 198 |
| 6.3.3 太阳能 LED 庭院灯设计实例 .....         | 201 |
| 6.3.4 40W LED 路灯配置方案 .....          | 202 |
| 6.3.5 太阳能 LED 路灯典型配置方案 .....        | 204 |
| 6.4 道路 LED 照明的方案设计 .....            | 207 |
| 6.4.1 道路照明要素 .....                  | 207 |
| 6.4.2 道路照明规划设计 .....                | 212 |
| 6.4.3 LED 路灯配光形状及优势 .....           | 223 |
| 6.4.4 LED 路灯照明设计实例 .....            | 226 |
| 6.5 太阳能 LED 路灯安装与调试 .....           | 228 |
| 6.5.1 太阳能 LED 路灯地基施工 .....          | 228 |
| 6.5.2 太阳能路灯安装 .....                 | 231 |
| 6.5.3 太阳能 LED 路灯调试 .....            | 237 |
| <b>参考文献</b> .....                   | 242 |

## 第1章

## 太阳能LED照明基础知识

## 1.1 光的基本知识

## 1.1.1 光的特性

## 一、光的定义

光是一种自然现象,当一束光投射到物体上时,光会发生反射、折射、干涉以及衍射等现象。人们之所以能够看到客观世界中斑驳陆离、瞬息万变的景象,是因为眼睛能够接收物体发射、反射或散射的光。就光的本质而言是一种电磁波,其覆盖的电磁频谱相当宽(从X射线到远红外)的范围,人类肉眼所能看到的可见光只是整个电磁波谱的一部分。

电磁波刺激人的眼睛,经过视觉神经传达到人的大脑,使人可以看到物体的形状和颜色,这段波长的电磁波称为可见光,可见光的波长不同,人眼感觉到的颜色也不同。可见光的波长范围在360~830nm之间,仅仅是电磁辐射光谱非常小的一部分。光的波长决定了光的性质。780~380nm的光依次是红、橙、黄、绿、青、蓝、紫七色光,两种颜色之间没有明显的分界。将全部可见光波混合在一起就形成日光,即白色光。波长大于780nm的电磁波是红外线、微波和无线电波等。波长小于380nm的电磁波是紫外线、X射线和宇宙射线等。

光以约 $3 \times 10^8 \text{ m/s}$ 的速度在空间传播。由图1-1可看出大部分电磁波都是肉眼看不见的。当光通过某种物质时,如水或空气,其传播速度就会减慢。光在真空中的传播速度和在媒质中的传播速度比值称为该媒质的折射率,在折射率不同的两种媒质的界面上,入射光线产生折射与发射现象。另外光在传播过程中还会产生散射、漫反射、漫透射现象。

| 波长      |         |         |         |         |         |         |     |
|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|-----|
| 0.001nm | 10nm    | 200nm   | 380nm   | 780nm   | 0.002nm | 1mm     | 1mm |
| X射线     | 远紫外线    | 近紫外线    | 可见光     | 近红外线    | 远红外线    | 无线电波    | 声音  |
|         |         |         |         |         |         |         |     |
| 颜色      | 紫       | 蓝       | 绿       | 黄       | 橙       | 红       |     |
| 波长 (nm) | 380~430 | 430~490 | 490~550 | 550~590 | 590~640 | 640~780 |     |

图1-1 电磁波的波谱

人们通常所说的光是指可见光,它是由光源发出的辐射能中的一部分,并能产生视觉效应。从量子物理的观点,光具有两重性:粒子性和波动性。单个光子呈粒子性,密集光子的集合衍射便呈现出波动性。所以,光是一种电磁辐射能,即电磁波,光线的方向也就是波的传播方向。

太阳和光源在发出可见光的同时,都会有紫外和红外辐射,只是人的眼睛视觉感觉不出来而已。在太阳光谱中,波长大于1400nm的光波被大气层中的水蒸气和二氧化碳吸收,波长小于290nm的光波被大气层中的臭氧所吸收。

人的眼睛对不同颜色光的视觉灵敏度不同,对光谱中心部位的黄、绿色光最灵敏,对两边的紫

光和红光都不灵敏。人类在进化过程中，紫外光和红外光对眼睛不产生视觉反应。紫外线会伤害人的眼睛，红外线只能刺激人的皮肤产生热的感觉。

## 二、辐射度量

辐射在本质上是一种能量的形式，如光辐射、热辐射、磁辐射等。辐射伴随着辐射能量的转移。辐射能量的度量通常以表 1-1 所列出的一些基本参量来描述。

表 1-1 辐射能量的度量基本参量

| 量的名称  | 符号         | 定义                                                   | 单位         | 单位符号             |
|-------|------------|------------------------------------------------------|------------|------------------|
| 辐射能   | $Q_e$      |                                                      | 焦耳         | J                |
| 辐射能密度 | $\omega_e$ | $dQ_e/dV$                                            | 焦耳/立方米     | $J/m^3$          |
| 辐射通量  | $\Phi_e$   | $dQ_e/dt$                                            | 瓦特         | W                |
| 辐射出射度 | $M_e$      | $d\Phi_e/dA$                                         | 瓦特/平方米     | $W/m^2$          |
| 辐射强度  | $I_e$      | $d\Phi_e/d\omega$<br>( $\omega$ 为点光源辐射通量所张开的立体角)     | 瓦特/球面度     | W/sr             |
| 辐射亮度  | $L_e$      | $dI_e/(dA\cos\theta)$<br>( $\theta$ 为观察方向与光源表面法线的夹角) | 瓦特/平方米·球面度 | $W/m^2 \cdot sr$ |
| 辐射照度  | $E_e$      | $d\Phi_e/dA$                                         | 瓦特/平方米     | $W/m^2$          |

为了对辐射度量有比较清楚的认识，下面对各参量作一些简要的说明。

(1) 辐射能  $Q_e$ 。以辐射的形式发射、传播或接收的能量称为辐射能。像其他任何形式的能一样，辐射能的单位是焦耳 (J)。

(2) 辐射能密度  $\omega_e$ 。单位体积内的辐射能称为光源的辐射能密度，用它的体密度来表示。其定义式为

$$\omega_e = dQ_e/dV \quad (1-1)$$

式中： $V$  为体积。辐射能密度单位是焦耳/立方米 ( $J/m^3$ )。

(3) 辐射通量  $\Phi_e$ 。单位时间内辐射的总能量称为辐射通量。辐射通量也可称为辐射功率。其表达式为

$$\Phi_e = dQ_e/dt \quad (1-2)$$

式中： $dQ_e$  为在  $dt$  时间内转移的单元能量。辐射通量的单位为瓦 ( $1W=1J/s$ )。

(4) 辐射强度  $I_e$ 。单位立体角（一个锥体的顶端在球心上，底面积等于球半径的平方，这锥体所包的立体角就叫做单位立体角）内离开辐射源的辐射通量称为辐射强度。其表达式为

$$I_e = d\Phi_e/d\omega \quad (1-3)$$

式中： $d\Phi_e$  为辐射源在  $d\omega$  立体角内所辐射出来的辐射通量。辐射强度的单位是瓦/球面度 ( $W/sr$ )。

(5) 辐射出射度  $M_e$ 。辐射体表面的单位面积内所辐射的通量称为辐射出射度。这是用来度量物体辐射能力的物理量。其表达式为

$$M_e = d\Phi_e/dA \quad (1-4)$$

式中： $d\Phi_e$  为辐射体表面的面积元  $dA$  向所有方向所发出的辐射通量。辐射出射度的单位是瓦/平方米 ( $W/m^2$ )。

(6) 辐射亮度  $L_e$ 。由辐射表面一点处的单位面积在给定方向上的辐射强度称为辐射亮度。在与辐射表面  $dA$  的法线成  $\theta$  角的方向上，辐射亮度等于该方向上的辐射强度  $dI_e$  与辐射表面在该方向垂直面上的投影面积之比。其表达式为

$$L_e = dI_e/(dA\cos\theta) \quad (1-5)$$

式中： $dA$  为某处辐射源表面的单位面积； $\theta$  为光源表面的法线与给定方向间的夹角。辐射亮度的单位为瓦/球面度平方米 [ $W/(m^2 \cdot sr)$ ]。

辐射亮度  $L_e$  的数值与辐射源的性质有关，并随给定方向而变。若  $L_e$  不随方向而变，则  $I_e$  正



比于  $\cos\theta$ ，即

$$I_e = I_0 \cos\theta \quad (1-6)$$

满足上式的特殊光源称为余弦辐射体，余弦辐射体也称为均匀漫反射体或朗伯体。除了黑体、灰体外，实验表明，抛毛乳白玻璃的透视光或反射光以及氧化镁、硫酸钡等表面的反射光很接近于理想的余弦辐射体。白雪对阳光的反射也符合余弦辐射体的规律。对余弦辐射体，即服从朗伯定律的辐射体可以推算出

$$M_e = \pi L_e \quad (1-7)$$

即余弦辐射体的辐射出射度在数值上为其辐射亮度的  $\pi$  倍。

(7) 辐射照度  $E_e$ 。辐射照度为接收面上单位面积所照射的辐射通量。其表达式为

$$E_e = d\Phi_e/dA \quad (1-8)$$

辐射照度的单位为  $W/m^2$ 。对于理想的散射面，满足条件  $M_e = E_e$ 。

$$E_e = \pi L_e \quad (1-9)$$

(8) 光谱辐射度量（辐射量的光谱密度）。为了表征辐射，不仅要知道总辐射通量和辐射强度，还应知道其光谱组分。因为辐射源发出的辐射，往往由许多波长的辐射组成，为了研究各种波长分别辐射的能量，而引入光谱辐射度量的概念。

除了特殊用途的辐射源（如红外光源和紫外光源）外，大量的辐射源是作为照明光源用的。照明光源的特性只用前面所叙述的一些能量参数来描述是不够的，因为能量参数并没有考虑到人眼的作用。由于照明的效果最终是以人眼来评定的，因此照明光源的光学特性必须用基于人眼视觉的光学参量即光度量来描述。

人的视神经对各种不同波长光的感光灵敏度是不一样的，如对绿光灵敏的人，对红光灵敏度要低得多。另外，由于不同人的视觉生理和心理作用不一样，不同的人对各种波长光的感光灵敏度也有差别。国际照明委员会（CIE）根据对许多人的大量观察结果，用平均值的方法，确定了人眼对各种波长光的平均相对灵敏度，称为“标准光度观察者”的光谱光视效率  $V(\lambda)$ ，或称视见函数。 $V(\lambda)$  的最大值在 555nm 处。此时， $V(\lambda)=1$ ，其他波长的  $V(\lambda)$  都小于 1。

当光亮度大于  $3cd/m^2$  时，人眼的锥状细胞起主要作用，敏感的光谱范围是 380~780nm，在 555nm 上最敏感，且能分辨出各种颜色，这种视觉称为明视觉，用  $V(\lambda)$  表示明视觉光谱的光视效率。

当亮度小于  $0.001cd/m^2$  时，人眼的锥状细胞不敏感而主要是柱状细胞起作用，敏感的光谱范围是 330~730nm，在 507nm 波长上最敏感，但不能分辨出各种颜色。这种视觉称为暗视觉或夜间视觉，用  $V'(\lambda)$  表示暗视觉光谱的光视效率。

光度量是人眼对相应辐射度量的视觉强度值，由于人眼对不同波长光的感光灵敏度不一样，能量相同而波长不同的光，在人眼中引起的视觉强度是不相同。表 1-2 列出了基本光度学的量、定义、单位和符号。

表 1-2 基本光度学的量、定义、单位和符号

| 量的名称 | 符号     | 定义式                                                     | 单位          | 单位符号          |
|------|--------|---------------------------------------------------------|-------------|---------------|
| 光通量  | $\Phi$ | $\Phi = K_m \int_A \Phi_{e\lambda} V(\lambda) d\lambda$ | 流明          | lm            |
| 光出射度 | $M$    | $d\Phi/dA$                                              | 流明/平方米      | $lm/m^2$      |
| 光照度  | $E$    | $d\Phi/dA$                                              | 勒克斯（流明/平方米） | $lx (lm/m^2)$ |
| 发光强度 | $I$    | $d\Phi/d\omega$                                         | 坎德拉（流明/球面度） | $cd (lm/sr)$  |
| 光亮度  | $L$    | $dI/(dA \cos\theta)$                                    | 坎德拉/平方米     | $cd/m^2$      |
| 光量   | $Q$    | $\int \Phi dt$                                          | 流明·秒        | $lm \cdot s$  |

### 三、照明用物理量与单位

#### (一) 立体角

在图 1-2 中, 从 O 点看表示光向空间展开的角度称为立体角, 单位为球面角度 (sr)。立体角

$\omega$  用下式表示

$$\omega = A/r^2 \quad (\text{sr}) \quad (1-10)$$

从 O 点开始, 半径为  $r$  (m), 球的面积为  $4\pi r^2$  ( $\text{m}^2$ ), 所以点的周围总立体角是  $4\pi$  (sr)。

#### (二) 光通量

光通量是光辐射通量对人眼所引起的视觉强度值。光通量的表示式为

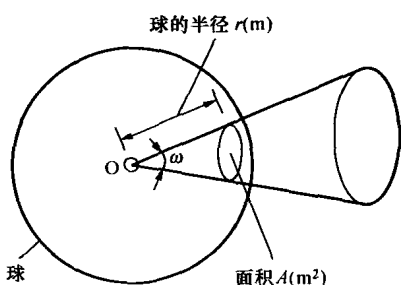


图 1-2 立体角

$$\Phi = K_m \int_{\lambda} \Phi_{e\lambda} V(\lambda) d\lambda = K_m \int_{380}^{780} \Phi_{e\lambda} V(\lambda) d\lambda \quad (1-11)$$

式中:  $K_m$  为辐射度量与光度量之间的比例系数;  $V(\lambda)$  为人眼的光谱光视效率, 积分限是波长小于 380nm 和大于 780nm 的不可见光,  $V(\lambda) = 0$ 。

在式 (1-11) 中, 等号的左边是光通量, 其单位是流明 (lm); 而等号的右边的  $\Phi_{e\lambda}$  是辐射通量, 单位是瓦 (W);  $V(\lambda)$  是一个无量纲的系数。所以等号右边存在一个系数  $K_m$ , 从而使两边的单位一致。显然,  $K_m$  的单位为  $\text{lm/W}$ , 称为最大光谱光视效率,  $K_m = 683 \text{ lm/W}$ 。  $K_m$  表示在波长为 555nm 处, 即人眼光谱光视效率最大 [ $V(\lambda) = 1$ ] 处, 与 1W 的辐射通量相当的光通量为 683lm。

衡量光源发出光多少的单位为光通量, 从光源发射并被人的眼睛接收的能量之和即为光通量。即光源在单位时间内发出光 (可见) 的总和, 符号为  $\Phi$ , 单位是流明 (lm)。光源所发出的光能是向所有方向辐射的, 对于在单位时间里通过某一面积的光能, 称为通过这一面积的辐射能通量。各色光的频率不同, 眼睛对各色光的敏感度也有所不同, 即使各色光的辐射能通量相等, 在视觉上并不能产生相同的明亮程度。在各色光中, 黄、绿色光能激起最大的明亮感觉。如果用绿色光作水准, 令它的光通量等于辐射能通量, 则对其他色光来说, 激起明亮感觉比绿色光为小, 光通量也小于辐射能通量。

绝对黑体在铂的凝固温度下, 从  $5.305 \times 10^3 \text{ cm}^2$  面积上辐射出来的光通量为 1lm。为表明光强和光通量的关系, 发光强度为 1 坎德拉的点光源在单位立体角 (1 球面度, 即 1sr) 内发出的光通量为 1lm。

一般情况下, 同类型光源的功率越高, 光通量也越大。例如: 一只 40W 的普通白炽灯的光通量为 350~470lm, 而一只 40W 的普通直管形荧光灯的光通量为 2800lm 左右, 为白炽灯的 6~8 倍。

#### (三) 发光强度

发光强度简称光强, 某方向每单位立体角的光通量称为发光强度, 符号为  $I$ , 单位是坎 [德拉] (cd)。如果光源是一个点, 称为点光源。图 1-3 表示从点光源向立体角  $\omega$  (sr) 发出的光通量为  $\Phi$  (lm) 时, 发光强度  $I$  (cd) 用下式表示

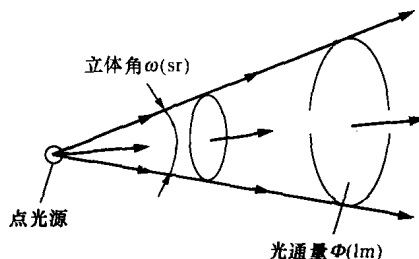


图 1-3 发光强度

$$I = \Phi/\omega \quad (1-12)$$

式中:  $\omega$  为立体角, 单位为球面度 (sr);  $\Phi$  为光通量, 单位为流明, 对于点光源  $I = \Phi/4$ 。

发光强度的单位为坎德拉 (cd)，坎德拉 (Candela) 是国际单位制中 7 个基本单位之一。其定义为：坎德拉 (cd) 是光源在给定方向上的发光强度，该光源发出 555nm 单色辐射，且在此方向上的辐射强度为 1/683W 每球面度时，在该方向上的发光强度为 1cd。

#### (四) 照度

入射到每单位面积的光通量称为照度，符号为  $E$ ，单位是勒 [克斯] (lx)。在图 1-4 中，光通量为  $\Phi$  (lm) 的光入射到面积为  $A$  (m<sup>2</sup>) 的面上，在此面上的照度  $E$  (lx) 表示如下

$$E = \Phi / A \quad (\text{lx}) \quad (1-13)$$

如果每平方米被照面上接收到的光通量为 1lm，则照度为 1lx。夏季阳光强烈的中午地面照度约为 5000lx，冬天晴天时地面照度约为 2000lx，晴朗的月夜地面照度约为 0.2lx。被照明物体在给定点处，单位面积上的入射光通量称为该点的照度

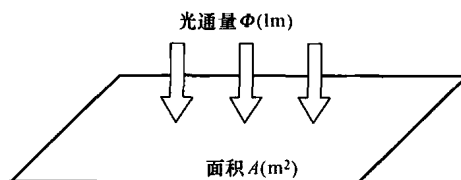


图 1-4 照度

$$E = d\Phi / dA \quad (1-14)$$

式中： $d\Phi$  为给定点处的面元  $dA$  上的光通量。照度的单位为勒克斯 (lx)。

对于受到光照后成为面光源的表面来说，其光出射度与光照度成正比

$$M = \rho E \quad (1-15)$$

式中： $\rho$  为小于 1 的系数，称为漫反射率，它与表面的性质有关。

#### (五) 发光度

与照度相反，从某个面的单位面积发散的光通量称为发光度，符号为  $M$ ，单位为流明每平方米 (lm/m<sup>2</sup>)。假设从面积为  $A$  (m<sup>2</sup>) 的面发散的光通量是  $\Phi$  (lm)，则发光度  $M$  (lm/m<sup>2</sup>) 用下式表示

$$M = \Phi / A \quad (\text{lm/m}^2) \quad (1-16)$$

不论从任何方向看，亮度都相同的表面称为全扩散面。在全扩散面上的发光度  $M$  (lm/m<sup>2</sup>) 与亮度的关系如下式

$$M = \pi L \quad (\text{lm/m}^2) \quad (1-17)$$

在图 1-5 中，反射光通量与入射光通量之比称为反射率。假设面的照度为  $E$  (lx)，面的反射率为  $\rho$ ，则反射面的发光度  $M_\rho$  (lm/m<sup>2</sup>) 用下式表示

$\Phi = \Phi_1 + \Phi_2 + \Phi_3$  (lm) 反射光通量与反射面的发光度相等

$\rho E$  (lm/m<sup>2</sup>)  
反射光通量  $\Phi_1$  (lm)

$$M_\rho = \rho E \quad (\text{lm/m}^2) \quad (1-18)$$

透过光通量与入射光通量之比称为透过率。假设面的透过率为  $\tau$ ，透过面的发光度  $M_\tau$  (lm/m<sup>2</sup>) 用下式表示

$$M_\tau = \tau E \quad (\text{lm/m}^2) \quad (1-19)$$

吸收掉的能量与入射能量之比称为吸收率。被吸收的能量在材料中转变成热能。反射率  $\rho$ 、透过率  $\tau$ 、吸收率  $\sigma$  之间有以下关系

$$\rho + \tau + \sigma = 1 \quad (1-20)$$

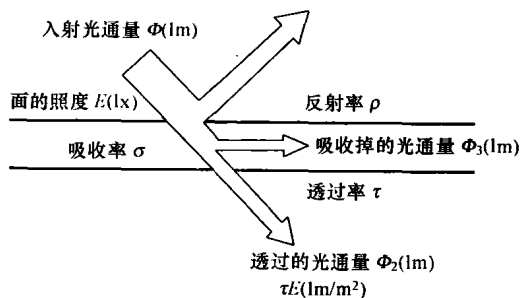


图 1-5 反射面与透过面的发光度

#### (六) 亮度

从某个方向看物体或光源的明亮程度称为亮度。一般是表示发光 (反射、透过) 面的明亮程度，亮度的符号为  $L$ ，单位为坎德拉每平方米 (cd/m<sup>2</sup>)。

在图 1-6 所示的球光源中，不论在什么方向都有相同的发光强度  $I$  (cd)。对着光源看它的外

观面积（面对光源的正投影）时，亮度就是每单位面积  $A$  ( $\text{m}^2$ ) 的发光强度，用下式表示

$$L = IA \quad (\text{cd}/\text{m}^2) \quad (1-21)$$

光通量、发光强度、照度、发光度、亮度之间的关系如图 1-7 所示。光源表面一点处的面元  $dA$ ，在给定方向上的发光强度  $dI$  与该面元在垂直平面上的正投影面积之比，称为光源在该方向上的亮度

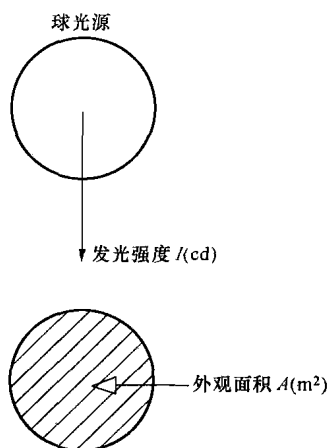


图 1-6 亮度

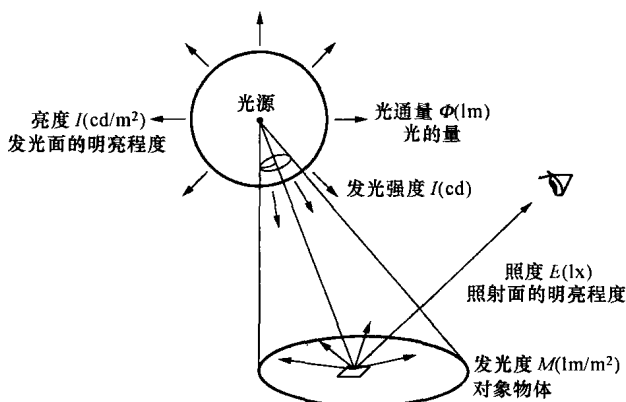


图 1-7 光通量、发光强度、照度、发光度、亮度的关系

$$L = dI / (dA \cos \theta) \quad (1-22)$$

式中： $\theta$  为给定方向与面元法线间的夹角。

亮度的单位为坎德拉每平方米 ( $\text{cd}/\text{m}^2$ )。对于余弦辐射体，光亮度不随方向而变。但不要把照度与亮度的概念混淆起来，它们是两个完全不同的物理量。照度表征受照面的明暗程度，照度与光源至被照面距离的平方成反比。而亮度是表征任何形式的光源或被照射物体表面是面光源时的发光特性。如果光源与观察者眼睛之间没有光吸收现象存在，那么亮度值与二者间距离无关。

### 1.1.2 光的质量

人的视觉器官在色彩刺激作用下引起大脑的反应，即视觉器官在受不同波长光线物理刺激的同时，产生色彩刺激信号并传给大脑，大脑将其接受的色彩信号不断地译成色彩概念，并与储存在大脑里的视觉经验结合起来，加以解释，形成了颜色知觉。颜色分非彩色和彩色。非彩色是指白色、黑色的各种深浅不同的颜色。彩色是指黑白系列以外的各种颜色。

由于感情效果和对客观事物的联想，色彩对视觉的刺激产生了一系列的色彩知觉心理效应。这种效应随着具体的时间、地点、条件（如外观形状、自然条件、个人爱好、生活习惯、形状大小及环境位置等）的不同而有所不同，一般来讲色彩可以产生温度感、距离感、重量感、空间感、阴暗感等。

#### 一、光源的色温

色温定义为黑体在不同温度下所辐射出的光色，与光源的光色接近时，则定义光源的相对色温为此黑体的温度。凯尔文认为，假定某一纯黑物体，能够将落在其上的所有热量吸收，而没有损失，同时又能够将热量生成的能量全部以“光”的形式释放出来的话，它便会因受到热力的高低而变成不同的颜色。

当光源所发出光的颜色与黑体在某一温度下辐射的颜色相同时，黑体的温度就称为该光源的色温，用绝对温度  $K$  (Kelvin, 或称开氏温度,  $K = ^\circ\text{C} + 273.15$ ) 表示。黑体辐射理论是建立在热辐射基础上的，所以白炽灯一类的热辐射光源的光谱功率分布与黑体在可见区的光谱功率分布比较接

近，都是连续光谱，用色温的概念完全可以描述这类光源颜色的特性。

当一个黑体（例如铁）被加热到一定的温度时开始发出暗红色的光，温度再升高光的颜色变成暗红色、黄白色、白色、蓝白色。例如，当黑体受到的热力相当于 500~550℃ 时，就会变成暗红色，达到 1050~1150℃ 时，就变成黄色，……因而，光源的颜色成分是与该黑体所受的热力温度相对应的。低色温呈暖色，高色温则呈冷色，例如：烛光的色温是 2000K，晴天中午时太阳的色温是 6500K。

根据 MaxPlanck 理论，将一具有完全吸收与放射能力的标准黑体加热，温度逐渐升高光色亦随之改变；CIE 色坐标上的黑体曲线（Blackbodylocus）显示了黑体由红—橙红—黄—黄白—白—蓝白的过程。黑体加温到出现与光源相同或接近光色时的温度，定义为该光源的相关色温度，单位为 K。由于气体放电光源一般为非连续光谱，与黑体辐射的连续光谱不能完全吻合，所以都采用相关色温来近似描述其颜色特性。色温度在 3000K 左右时，光色偏黄。色温（或相关色温）在 3300K 以下的光源，颜色偏红，给人一种温暖的感觉。色温超过 5300K 时，颜色偏蓝，给人一种清冷的感觉。不同色温的光，具有不同的照明和视觉效果。通常气温较高的地区，人们多采用色温高于 4000K 的光源，而气温较低的地区则多用 4000K 以下的光源。不同光源环境的相关色温见表 1-3。

表 1-3 不同光源环境的相关色温

| 光源     | 色温 (K)    | 光源    | 色温 (K)    |
|--------|-----------|-------|-----------|
| 北方晴空   | 8000~8500 | 高压汞灯  | 3450~3750 |
| 阴天     | 6500~7500 | 暖色荧光灯 | 2500~3000 |
| 夏日正午阳光 | 5500      | 卤素灯   | 3000      |
| 金属卤化物灯 | 4000~4600 | 钨丝灯   | 2700      |
| 下午日光   | 4000      | 高压钠灯  | 1950~2250 |
| 冷色荧光灯  | 4000~5000 | 蜡烛光   | 2000      |

光源色温不同，光色也不同，色温在 3300K 以下有稳重的气氛，温暖的感觉；色温在 3000~5000K 为中间色温，有爽快的感觉；色温在 5000K 以上有冷的感觉。不同光源的不同光色组成的最佳环境，见表 1-4。

表 1-4 不同光源的不同光色组成最佳环境

| 色温 (K)    | 光色        | 气氛效果  |
|-----------|-----------|-------|
| >5000     | 清凉（带蓝的白色） | 冷的气氛  |
| 3300~5000 | 中间（白）     | 爽快的气氛 |
| <3300     | 温暖（带红的白色） | 稳重的气氛 |

在高色温光源照射下，如亮度不高则给人们有一种阴冷的气氛；在低色温光源照射下，亮度过高会给人们有一种闷热感觉。在同一空间使用两种光色差很大的光源，将会出现层次效果，光色对比大时，在获得亮度层次的同时，又可获得光色的层次。不同的色温会引起人们在情绪上不同的反应，一般把光源的色温分成三类：

- (1) 暖色光。暖色光的色温在 3300K 以下，暖色光与白炽灯光色相近，红光成分较多，给人以温暖、健康、舒适的感觉，适用于家庭、住宅、宿舍、医院、宾馆等场所，或温度比较低的地方。
- (2) 暖白光。又叫中间色，它的色温在 3300~5300K。暖白光的光线柔和，使人有愉快、舒适、安详的感觉，适用于商店、医院、办公室、饭店、餐厅、候车室等场所。
- (3) 冷色光。又叫日光色，它的色温在 5300K 以上，光源接近自然光，有明亮的感觉，使人精



力集中,适用于办公室、会议室、教室、绘图室、设计室、图书馆的阅览室、展览橱窗等场所。

二、光源的显色性

牛顿在 1664 年用棱镜把白色的太阳光色散成不同色调的光谱,奠定了光颜色的物理基础。1860 年麦克斯韦用不同强度的红、黄、绿三色光配出了从白光一直到各种颜色的光,奠定了三色色度学的基础。在此基础上,1931 年国际照明委员会建立了 CIE 色度学系统,并不断完善。如今 CIE 色度系统已广泛用于定量地表达光的颜色。

颜色离不开照明,只有在光照下物体才有可能显示出颜色,而且光的颜色对人们的心理有非常大的影响。在不同光源照射下,同一个物体会显示出不同的颜色。例如绿色的树叶在绿光照射下,有鲜艳的绿色,在红光照射下近于黑色。由此可见,光源对被照物体颜色的显现,起着重要的作用。光源在照射物体时,能否充分显示被照物体颜色的能力,称为光源的显色性。

光源对物体颜色的显色性,也就是物体在光源的照射下物体颜色的逼真程度。光源的显色性是用显色指数来表明的,它表示物体在光下颜色比基准光(太阳光)照明时颜色的偏离,能较全面反映光源的颜色特性。显色性高的光源对颜色的表现较好,人们所看到的颜色也就比较接近自然颜色,显色性低的光源对颜色的表现较差,所看到的颜色偏差也较大。

显色性有高低之分,其关键在于光的特性,可见光的波长在 380~780nm 范围内,也就是在光谱中见到的红、橙、黄、绿、青、蓝、紫光的范围,如果在光源发射的光中,所含的各色光的比例与自然光相近,则眼睛所看到的颜色也就较为逼真。

光源对物体的显色能力是通过与同色温的参考或基准光源(白炽灯)下物体外观颜色的比较,光所发射的光谱范围决定光源的光色,但同样的光色有许多,少数的甚至仅为两个单色的光波合成,对各个颜色的显色性亦大不相同。相同光色的光源会有相异的光谱组成,光谱组成较广的光源,可提供较佳的显色品质。当光源光谱中很少或缺乏物体在基准光源下所反射的主波时,会使颜色产生明显的色差(colorshift)。色差程度越大,光源对该色的显色性越差。显色分为两种:

(1) 忠实显色。忠实显色能正确表现物质本来的颜色,要实现忠实显色,需使用显色指数( $R_a$ )高的光源,其数值接近 100,显色性最好。

(2) 效果显色。要鲜明地强调特定色彩,可以利用加色的方法来加强显色效果。采用低色温光源照射,能使红色更加鲜艳;采用中等色温光源照射,使蓝色具有清凉感;采用高色温光源照射,使物体有冷的感觉。

太阳光和白炽灯均辐射连续光谱,在可见光的波长(380~760nm)范围内,包含着红、橙、黄、绿、青、蓝、紫等各种色光。物体在太阳光和白炽灯的照射下,显示出它的真实颜色,但当物体在非连续光谱的气体放电灯的照射下,颜色就会有不同程度的失真。为了对光源的显色性进行定量的评价,引入显色指数的概念。以标准光源为基准,将其显色指数定为 100,其余光源的显色指数均低于 100。显色指数用  $R_a$  表示, $R_a$  值越大,光源的显色性越好。在国际照明协会中,一般把显色指数分成五类,见表 1-5。

表 1-5 国际照明协会对显色指数的分类

| 类别 | $R_a$ | 显色性 | 适用范围                           |
|----|-------|-----|--------------------------------|
| 1A | >90   | 优良  | 需要色彩精确对比的场所,美术馆、博物馆及印刷等行业及场所   |
| 2B | 80~90 |     | 需要色彩正确判断的场所,家庭、饭馆、高级纺织工艺及相近行业  |
| 2  | 60~80 | 普通  | 需要中等显色性的场所,办公室、学校、室外街道照明       |
| 3  | 40~60 |     | 对显色性的要求较低,色差较小的场所,重工业工厂、室外街道照明 |
| 4  | 20~40 | 较差  | 对显色性无具体要求的场所,室外道路照明及一些要求不高的地方  |

光源显色指数表示光源的色彩还原性能,即所谓灯下辨色性能。为了自然、真实的表现被照物体的色彩,光源的显色指数应大于80%以上。把白炽灯的显色指数定义为100,视为理想的基准光源。

## 1.2 光电技术的半导体基础

### 1.2.1 半导体的特性

自然界中存在着各式各样的物质,它们可以是气体、液体或固体。固体,按其原子排列来说,可以分成晶体与非晶体两类,按导电能力,则可分成导体、绝缘体和介于二者之间的半导体三种。

不同材料的电阻率有很大的差别,通常把电阻率在  $10^{-6} \sim 10^{-3} \Omega\text{cm}$  范围内的物质称为导体(如银、铜、铝、铁等金属);电阻率在  $10^{12} \Omega\text{cm}$  以上的物质称为绝缘体(如塑料、陶瓷、橡皮、石英玻璃等);电阻率介于导体和绝缘体之间的物质则称为半导体。把有代表性的物质按电阻率的大小排列在一直线上,如图1-8所示,中间状态的物质就是半导体。

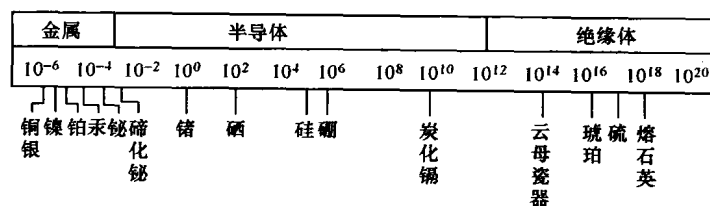


图1-8 物质按电阻率的大小排列图

导体、绝缘体和半导体三者之间虽然在电阻率的区分上无绝对明确的界限,但在性质上却有极大的差别。由于半导体具有许多特殊的性质,因而在电子工业与光电工业等方面占有极其重要的地位。

半导体的导电性能可受极微量杂质的影响而发生十分显著的变化,如纯硅在室温下的电导率为  $5 \times 10^{-6} / \Omega\text{cm}$ ,当掺入硅原子数的百万分之一的杂质时,其纯度虽仍高达99.9999%,但电导率却上升至  $2 / \Omega\text{cm}$ ,几乎增加了一百万倍,此外,随着所掺入的杂质的种类不同,可以得到相反导电类型的半导体。如在硅中掺入硼,可得到P型半导体;掺入锑可得到N型半导体。

半导体的导电能力及性质会受热、光、电、磁等外界作用的影响而发生非常重要的变化。例如沉积在绝缘基板上的硫化镉层不受光照时的阻抗可高达几十甚至几百兆欧,但一旦受到光照,电阻就会下降到几十千欧,甚至更小。

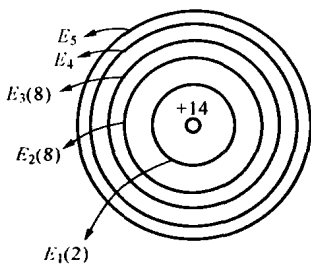
常见的半导体材料有硅、锗、硒等元素半导体,砷化镓(GaAs)、铝砷镓(GaAlAs)、锑化铟(Insb)、硫化镉(CdS)和硫化铅(PbS)等化合物半导体,还有如氧化亚铜的氧化物半导体,如砷化镓-磷化镓固熔体半导体,以及有机半导体、玻璃半导体、稀土半导体等。利用半导体的特殊性质,制成了热敏器件、光电器件(太阳能电池)、场效应器件、体效应器件、霍耳器件、红外接收器件、电荷耦合器件、摄像管及各种发光二极管(LED)、三极管、集成电路等半导体器件。

为了解释固体材料的不同导电特性,人们从电子能级的概念出发引入了能带理论。它是半导体物理的理论基础,应用能带理论可以解释发生在半导体中的各种物理现象和各种半导体器件的工作原理。

## 一、能带理论

原子是由一个带正电的原子核与一些带负电的电子所组成, 这些电子环绕着原子核在各自的轨道上不停地运动。根据量子论, 电子运动有以下三个重要特点:

(1) 电子绕核运动, 具有完全确定的能量, 这种稳定的运动状态称为量子态。确定每一量子态



的能量称为能级。在硅原子中, 电子绕核运动的轨道及与其相应的能级示意图, 如图 1-9 所示。

硅原子中的 14 个电子, 分别有 14 种不同的量子态, 分布在离原子核远近不同的三层轨道上。最里层的量子态, 电子距原子核最近, 受原子核束缚最强, 能量最低。越外层的量子态, 电子受原子核束缚越弱, 能量越高。电子可以吸收能量从低能级跃迁到高能级上去, 电子也可以在一定条件下释放出能量重新落回到低能级上来, 但不可能以介于各能级之间的量子态存在。

图 1-9 硅原子中电子绕核运动的轨道及与其相应的能级示意图

(2) 由于微观粒子具有粒子与波动的两重性, 因此, 严格说原子中的电子没有完全确定的轨道。但为方便描述, 仍用“轨道”这个词, 这里的“轨道”所代表的是电子出现几率最大的一部分区域。

(3) 在一个原子或原子组成的系统中, 不能有两个电子同处于一个量子态, 即在每一个能级中, 最多只能容纳两个自旋方向相反的电子, 这就是泡利不相容原理。此外, 电子首先填满低能级, 而后依次向上填, 直到所有电子填完为止。

## 二、晶体中电子的能带

物质是由原子组成的, 原子以一定的周期重复排列所构成的物体称为晶体。当原子结合成晶体时, 因为原子之间的距离很近, 不同原子之间的电子轨道(量子态)将发生不同程度的交叠。当然, 晶体中两个相邻原子的最外层电子的轨道重叠最多。这些轨道的交叠, 使电子可以从一个原子转移到另一个原子上去。结果, 原来隶属于某一原子的电子, 不再是仅此原子所有, 而是可以在整个晶体中运动, 成为整个晶体所共有, 这种现象称作电子的共有化。晶体中原子内层和外层电子的轨道交叠程度很不相同。越外层电子的交叠程度越大, 且原子核对它的束缚越小。因此, 最外层电子的共有化特征最显著。

晶体中电子虽然可以从一个原子转移到另一个原子, 但它只能在能量相同的量子态之间发生转移。所以, 共有化的量子态与原所处的能级之间存在着直接的对应关系。由于电子的这种共有化, 整个晶体成了统一的整体。这些能级互相靠得很近, 分布在一定的能量区域。

为此将这能量区域中密集的能级形象地称为能带, 由于能带中能级之间的能量差很小, 所以通常可以把能带内的能级看成是连续的。在一般的原子中, 内层电子的能级都是被电子填满的。当原子组成晶体后, 与这些内层的能级相对应的能带也是被电子所填满的。在理想的绝对零度下, 在硅、锗、金刚石等共价键结合的晶体中, 从其最内层的电子直到最外边的价电子都正好填满相应的能带。能量最高的是价电子填满的能带, 称为价带。价带以上的能带基本上空的, 其中能量最低的带常称为导带。价带与导带之间的区域称为禁带。绝缘体、半导体、导体的能带情况如图 1-10 所示。

一般, 绝缘体的禁带比较宽, 价带被电子填满, 而导带一般是空的。半导体的能带与绝缘体相似, 在理想的绝对零度下, 也有被电子填满的价带和全空的导带, 但其禁带比较窄。正因为如此, 在一定的条件下, 价带的电子容易被激发到导带中去。半导体的许多重要特性就是由此引起的。而导体的能带情况有两种: 一是它的价带没有被电子填满, 即最高能量的电子只能填充价带的下半部

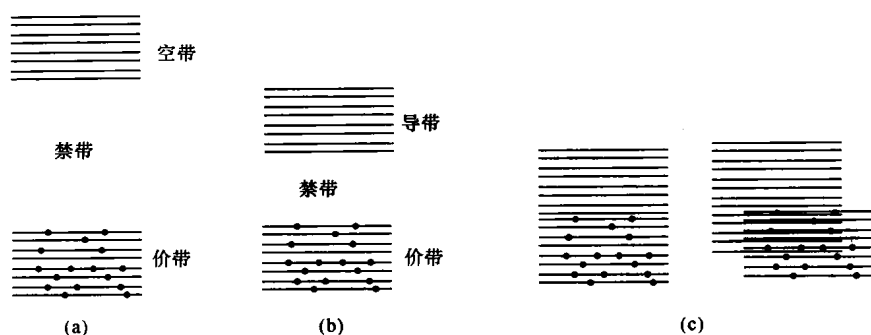


图 1-10 绝缘体、半导体、导体的能带情况图  
(a) 绝缘体; (b) 半导体; (c) 导体

分,而上半部分空着;二是它的价带与导带相重叠。

上述关于能带形成的论证是不严格的,能带和原子能级之间的对应关系,并不像上述解释的那样单纯,也并不永远都是一个原子能级对应于一个能带。并且,能带图并不实际存在,绝缘体、半导体、导体的能带理论只是用来说明电子的能量分布。

### 1.2.2 半导体的导电机理

当在一块半导体的两端加上电压后,则价电子在无规则的热运动基础上叠加了由电场引起的定向运动,形成了电流,并且它的运动状态也发生了变化,因而其运动能量必然与原来热运动时有所不同。在晶体中,根据泡利不相容原理,每个能级上最多能容纳两个电子。因此,要改变晶体中电子的运动状态,以便改变电子的运动能量,使它跃迁到新的能级中去,一般需要满足两个条件:①具有能向电子提供能量的外界作用;②电子要跃入的那个能级是空的。

由于导带中存在大量的空能级,当有电场作用时,导带电子能够得到能量而跃迁到空的能级中去,即导带电子能够改变运动状态。这也就是说,在电场的作用下,导带电子能够产生定向运动而形成电流,所以导带电子是可以导电的。

如果价带中填满了电子而没有空能级,在外加电场的作用下,电子又没有足够能量激发到导带,那么,电子运动状态无法改变,因而不能形成定向运动,也就没有电流。因此,填满电子的价带中的电子是不能导电的。如果价带中的一些电子在外界作用下跃迁到导带,那么在价带中就留下了缺乏电子的空位。可以设想,在外加电场作用下,邻近能级的电子可以跃入这些空位,而在这些电子原来的能级上又出现了新的空位。其后,其他电子又可以再跃入这些新的空位,这就好像空位在价带中移动一样,只是其移动方向与电子相反。因此,对于有电子空位的价带,其电子运动状态就不再是不可改变的了。在外加电场的作用下,有些电子在原来热运动上叠加了定向运动,从而形成了电流。

导带和价带的导电情况是有区别的,即:导带的电子愈多,其导电能力愈强;而价带的电子的空位愈多,即电子愈少,其导电能力就愈强,通常把价带的电子空位想象为带正电的粒子。显然,它所带的电量与电子相等,符号相反。在电场作用下,它可以自由地在晶体中运动,像导带中的电子一样能够起导电作用,这种价带中的电子空位,通常称为空穴。由于电子和空穴都能导电,一般把它们统称为载流子。

完全纯净和结构完整的半导体称为本征半导体。它的能带图如图 1-11 所示。图 1-11 (a) 是假设在绝对零度时,又不

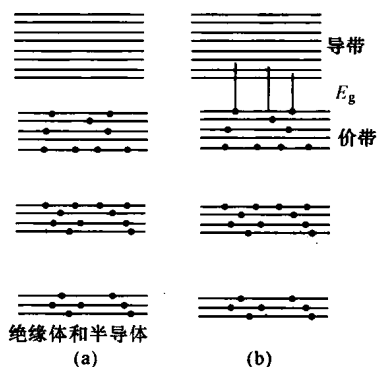


图 1-11 本征半导体能带图  
(a)  $T=0\text{K}$ ; (b)  $T>0\text{K}$