

# LED 器件的

原 理 及 应 用

周敏彤 吴丹 陈蕾 编著

LED QIJIAN DE YUANLI JI YINGYONG



苏州大学出版社  
Soochow University Press

## 图书在版编目(CIP)数据

LED 器件的原理及应用 / 周敏彤, 吴丹, 陈蕾编著  
—苏州: 苏州大学出版社, 2020.8  
ISBN 978-7-5672-3253-2

I. ①L… II. ①周… ②吴… ③陈… III. ①发光二  
极管—照明—研究 IV. ①TN383

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2020)第 130498 号

## LED 器件的原理及应用

周敏彤 吴丹 陈蕾 编著

责任编辑 周建兰

---

苏州大学出版社出版发行

(地址: 苏州市十梓街 1 号 邮编: 215006)

宜兴市盛世文化印刷有限公司印装

(地址: 宜兴市万石镇南漕河滨路 58 号 邮编: 214217)

---

开本 787 mm×1 092 mm 1/16 印张 12.75 字数 278 千

2020 年 8 月第 1 版 2020 年 8 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-5672-3253-2 定价: 36.00 元

---

若有印装错误, 本社负责调换

苏州大学出版社营销部 电话: 0512-67481020

苏州大学出版社网址 <http://www.sudapress.com>

苏州大学出版社邮箱 [sdcbs@suda.edu.cn](mailto:sdcbs@suda.edu.cn)

# 前言

QIANYAN.....

光给人类带来了缤纷与色彩，带来视觉与认知，光是生命之必须，它是一切动植物、细菌或单细胞生物体生命历程中不可或缺的存在。人类发展史是伴随着对于光与光源的利用与发现、认知与创造的历史。太阳带来了自然的光明与温暖，人们还发明了火把、油灯、白炽灯等人工光源。伴随着文明的进步，自然或人工光的应用早已不再局限于照明，还用于光影的创造、装饰与显示。这样的追寻与拓展的新近实例之一便是近一个世纪之前，人们在发现了电致发光现象后不久发明的发光二极管（LED, light emitting diode）。

然而，LED真正给世界带来改变是在20世纪60年代之后。从那时起，随着材料、半导体及其他相关领域科学技术的进步，在短短几十年期间，LED经历了巨大的发展：光线从单色转变为真彩色，亮度从低亮转变为高亮、超高亮，使用寿命大幅延长，市场规模获得巨大扩张。自LED诞生以来，几乎是每10年亮度增加20倍，价格下降到原来价格的1%。物美价廉的LED产品的不断丰富与性能的日臻完善，广泛地影响了人类社会的许多领域。LED技术在照明领域的影响尤为显著，与传统照明技术相比，它具有强大的优势和竞争力。LED作为高效固态发光光源，被称为第四代照明光源、绿色光源，广泛应用于现代资讯、通信设施、家电照明、交通信号灯、景观装饰灯、汽车照明、显示面板、数码照相或摄像机以及生物医疗等众多领域中。与白炽灯泡和节能灯相比，LED具有效率高、价格低、使用寿命长等诸多优点。例如，LED的耗电量仅为白炽灯的1/10和节能灯的1/4；发光效率则可高达249lm/w，约为荧光灯的4倍，寿命可达100 000小时。同时，LED技术与产品也更显环境友好，仅使用1/1 000的稀土元素，比传统节能灯的使用量小得多，也不含汞蒸气等有害物质。LED的开发是继白炽灯照明发展历史120年以来的第二大革命。因此，它的出现被认为是21世纪最具发展前景的高新技术领域之一。

本书从实用的角度出发，向读者呈现LED应用与设计中的必需的基础知识、方法与技术；从设计人员的视角出发，分析应用中会遇到的一些问题以及它们的解决方法；帮助读者从各类LED器件与技术中选择符合实际工程应用需求的方案。

全书共分7章，分别介绍了LED器件的材料、结构、物理特性等一些基础知识，

选取了 LED 器件两种比较典型的应用场景：LED 照明源和 LED 显示屏，较全面地分析了 LED 器件在这两种应用中的设计要求，给出了驱动电路的设计方法与具体实例。

第 1 章对 LED 的基础知识、基本性能参数、发光原理、常用材料和结构特点等做了比较详细的介绍。第 2 章是本书的重点内容之一，讨论了电阻限流、恒流源以及脉冲宽度调制三种方法来驱动单个 LED 的方法，它们也是所有 LED 器件应用驱动电路的设计与技术基础。第 3、第 4 章介绍的内容与 LED 器件作为电光源在照明设备中的应用有关，第 3 章介绍单个照明设备中的 LED 电光源的组成以及驱动电路设计，第 4 章介绍在 LED 照明大规模应用中，如何构成智能照明网络系统，包括 LED 电光源网络的建立、对网络中的 LED 电光源进行远程控制和管理等内容。第 5、第 6 章介绍了 LED 显示屏的驱动电路设计，详细讨论了完整且可复现的 LED 显示屏应用实例。第 7 章给出了若干使用单片机对 LED 器件进行控制的应用实例。

本书涉及物理、光学、电子技术、计算机技术和物联网技术等相关学科，可用作高等学校有关专业相关课程的综合应用实践指导教材或课程设计教材。为了让尽可能多的读者获益，本书对物理学方面理论深度作了适当控制，仅限于理解 LED 应用系统所必须的基础知识。相对强化了 LED 器件的电学特性、光学特性对电路设计的影响以及驱动电路的分析与介绍，并给出了 LED 器件的一些应用实例，由浅入深，循序渐进，便于学生或其他读者的阅读和理解。本书也可以作为 LED 领域工程技术人员的参考用书。

本书由周敏彤、吴丹、陈蕾编著，邱国平也参与了部分工作，最后全书由周敏彤统稿。在编写本书的过程中，邹丽新教授和施国梁副教授阅读了初稿，并提出了许多宝贵的建议，在此表示诚挚的感谢。

限于作者水平，书中难免会有不妥之处甚至错误之处，恳请读者不吝赐教。

编者

2020 年 5 月

# 目 录

MULU.....

## 第 1 章 LED 理论基础 001

---

- 1.1 LED 发光原理 / 001
- 1.2 色度学原理 / 003
- 1.3 LED 性能参数 / 006
- 1.4 LED 常用材料 / 014
- 1.5 LED 光学结构设计 / 019
- 1.6 世界各国的 LED 行业标准 / 023
- 1.7 本章小结 / 032

## 第 2 章 LED 器件的驱动原理和方法 033

---

- 2.1 电阻限流驱动 / 033
- 2.2 恒流源驱动 / 036
- 2.3 本章小结 / 053

## 第 3 章 LED 电光源及驱动电路 054

---

- 3.1 LED 照明源简介 / 054
- 3.2 LED 电光源的组成 / 055
- 3.3 LED 电光源的驱动技术 / 063
- 3.4 本章小结 / 081



## 第4章 LED电光源的网络控制

082

- 4.1 LED电光源网络控制的基本概念 / 082
- 4.2 LED电光源远程控制的网络架构 / 090
- 4.3 ZigBee网络通信协议 / 093
- 4.4 LED智能照明控制系统的设计 / 100
- 4.5 本章小结 / 113

## 第5章 LED显示屏及驱动电路

115

- 5.1 与LED显示屏相关的一些基本概念与术语 / 115
- 5.2 LED显示屏的分类 / 119
- 5.3 LED显示屏的组成、质量评价 / 120
- 5.4 LED显示屏的驱动原理 / 123
- 5.5 LED显示屏的扫描方式 / 125
- 5.6 LED模组的驱动 / 127
- 5.7 LED视频显示屏的驱动电路 / 136
- 5.8 本章小结 / 138

## 第6章 LED显示屏驱动实例

139

- 6.1 概述 / 139
- 6.2 LED显示屏驱动的硬件电路设计 / 141
- 6.3 控制器软件结构 / 149
- 6.4 本章小结 / 167

## 第7章 LED的单片机控制实例

168

- 7.1 LED彩灯控制 / 168
- 7.2 LED路灯的自动开关控制 / 182
- 7.3 汽车LED转向灯的单片机控制 / 188
- 7.4 本章小结 / 194

## 参考文献 / 195

# 第 1 章

## LED 理论基础

本章介绍了 LED 的理论基础，包括 LED 发光原理、色度学原理、LED 性能参数、LED 常用材料、LED 光学结构设计以及世界各国的 LED 行业标准，可给高等院校相关专业的师生以及从事 LED 照明设计和应用的工程技术人员提供理论参考。

### 1.1 LED 发光原理

LED 即发光二极管，是利用半导体同质 PN 结、异质 PN 结、金属-半导体 (MS) 结、金属-绝缘体-半导体 (MIS) 结制成的发光器件。其工作原理以及某些电学特性与一般晶体二极管相同，但使用的晶体材料不同。LED 包括可见光、不可见光、激光等不同类型，生活中常见的为可见光 LED。发光二极管的发光颜色取决于所用材料，目前有黄、绿、红、橙、蓝、紫、青蓝、白、全彩等多种颜色，可以制成长方形、圆形等各种形状。LED 具有寿命长、体小量轻、耗电量小、成本低等优点，且其工作电压低、发光效率高、发光响应时间极短、工作温度范围宽、光色纯、结构牢固（抗冲击、耐振动）、性能稳定可靠等特点，因此倍受人们的青睐。

LED 的发光体接近“点”光源（图 1.1），灯具设计较为方便，但若作为大面积显示时，电流和功耗都较大。LED 一般可用于电子设备的指示灯、数码管、显示板等显示器件和光电耦合器件，也常用于光通信以及建筑物轮廓、游乐园、广告牌、街道、舞台等场所的装饰。



图 1.1 LED 点光源

LED 点光源分为目标点光源 (Target Point) 和自由点光源 (Free Point) 两种类型。

- 目标点光源可用来向一个目标点投射光线，其光线的分布属性有各向同性 (isotropic)、聚光灯 (spotlight) 和网状 (web) 三种。
- 自由点光源的功能和目标点光源一样，只是没有目标点，用户可自行变换灯光的方向。同样地，自由点光源也具有上述三种光度控制光线分布属性。

我们知道，发光是一种能量转换现象，当系统受到外界激发后，会从稳定的低能态跃迁到不稳定的高能态。当系统由不稳定的高能态重新回到稳定的低能态时，如果多余的能量以光的形式辐射出来，就会产生发光现象。半导体发光二极管利用注入PN结的少数载流子与多数载流子复合，从而发出可见光，它是一种直接把电能转化为光能的发光器件，如图 1.2 所示。

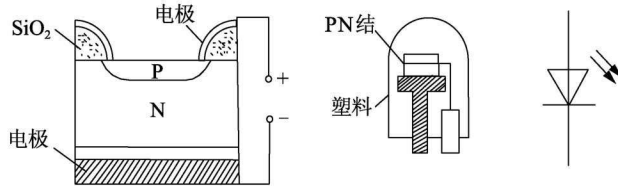


图 1.2 LED 的结构图与符号

LED 是一种固态的半导体器件，是由 III-IV 族化合物，如 GaAs (砷化镓)、GaP (磷化镓)、GaAsP (磷砷化镓) 等半导体材料制成的。例如，在 IV 族元素中掺杂 V 族元素，就形成导带中具有电子的 N 型材料；在 IV 族元素中掺入 III 族元素，就能形成价带中有空穴的 P 型材料。若在硅晶体中一半掺杂 V 族元素，另一半掺杂 III 族元素，则在两半之间的边界上形成一个 PN 结，如图 1.3 所示。它具有一般 PN 结的  $I-U$  特性，即正向导通，反向截止、击穿特性 (图 1.4)。

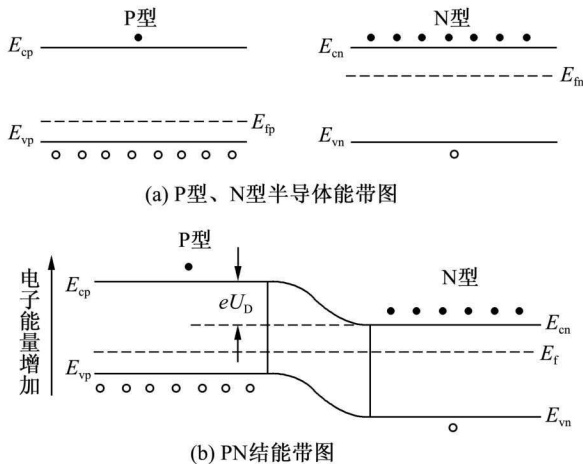


图 1.3 P 型、N 型半导体和 PN 结能带图

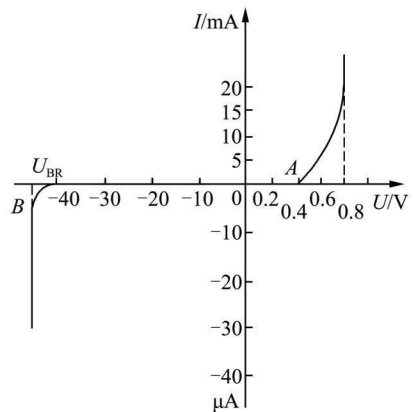


图 1.4 PN 结伏安特性曲线

当给发光二极管的 PN 结加上正向电压时，外加电场将削弱内电场，使结区变窄，载流子的扩散运动加强，由于电子的迁移率总是远大于空穴的迁移率，因此电子由 N 区扩散到 P 区，是载流子扩散运动的主体。当导带中的电子与价带中的空穴复合时，电子由高能态跃迁到低能态，电子将多余的能量以发射光子的形式释放出来，产生电致发光现象，而光线的波长、颜色跟其所采用的半导体材料种类与故意渗入的元素杂质有关。发光二极管辐射光的峰值波长取决于材料的禁带宽度  $E_g$ ，即

$$\lambda = \frac{1.24}{E_g (\text{eV})} \mu\text{m} \quad (1.1)$$

由于不同材料的禁带宽度不同，故电子和空穴所占的能级也有所不同。能级的高低差影响电子和空穴复合后光子的能量，从而产生不同波长的光，也就是不同颜色的光。所以由不同材料制成的发光二极管可发出不同波长的光，像荧光灯一样，由于 LED 的出射光为位于可见光光谱范围内的窄带光，所以看上去是有颜色的，如红、橙、黄、绿等可见光。要使它变成接近自然光的白光，还需将出射的窄带有色光转化成占满整个可见光光谱的白光。现在已有红、黄、绿及蓝等颜色的 LED，但由于材料及制造工艺等原因，成本有所高低。

## 1.2 色度学原理

### 1. 色度坐标

LED 光源发出的光之所以能够展现出不同的颜色，是因为光的波长不同，人们通常会利用色度图和颜色匹配函数来对颜色进行评估和定量。光通量变化也会让人感觉到颜色稍有不同。因此，人们对颜色的感觉在某种程度上来说是主观的。

1931 年，国际照明委员会（CIE）将色度图以及颜色匹配的测量进行了标准化，如图 1.5 所示。

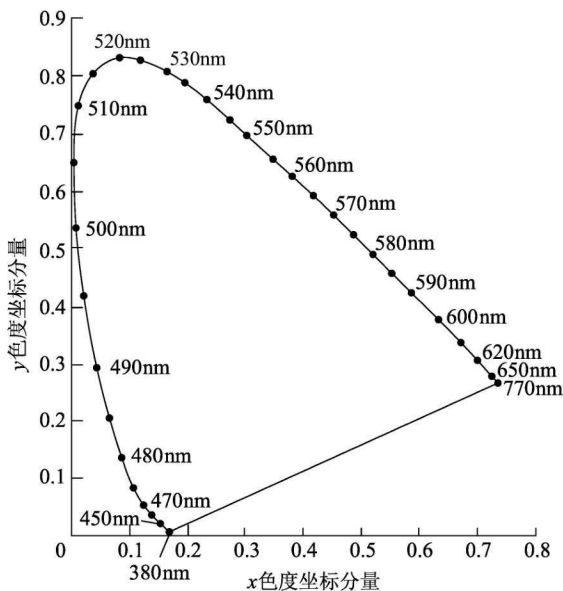


图 1.5 1931 年国际照明委员会提供的  $y-x$  色度图

色度匹配函数与色度图并非唯一的，目前常用的是 1931 年发布的色度图。设一个固定波长的光功率密度为  $P(\lambda)$ ，则能够与之相匹配的颜色激发比例可通过下面

的式子得出：

$$X = \int \bar{x}(\lambda) P(\lambda) d\lambda \quad (1.2)$$

$$Y = \int \bar{y}(\lambda) P(\lambda) d\lambda \quad (1.3)$$

$$Z = \int \bar{z}(\lambda) P(\lambda) d\lambda \quad (1.4)$$

其中， $X$ ， $Y$ ， $Z$  分别是 R，G，B 三基色的权重，因此，位于色度图中的每个颜色都可以用  $x$ ， $y$  坐标的形式来表示：

$$x = \frac{X}{X+Y+Z} \quad (1.5)$$

$$y = \frac{Y}{X+Y+Z} \quad (1.6)$$

由上式可知，光的色彩坐标是单色光的坐标线性组合。任何颜色都可以由红、绿、蓝三原色以适当的比例混合调制而成。其中坐标  $x$  代表红原色的比例，坐标  $y$  代表绿原色的比例，坐标  $z$  代表蓝原色的比例，坐标  $z$  可以由  $z=1-x-y$  推出。

LED 显示器件发出的光同样满足 CIE 色度匹配，其发光颜色可以在色度图上找到对应的位置。不同材料制成的 LED 显示器件对应的颜色在色度图上的位置如图 1.6(a) 所示。

研究表明，通过三色 LED 进行调制的全彩图像，其色域范围已经超过 NTSC (国家电视标准委员会) 标准，如图 1.6(b) 所示。

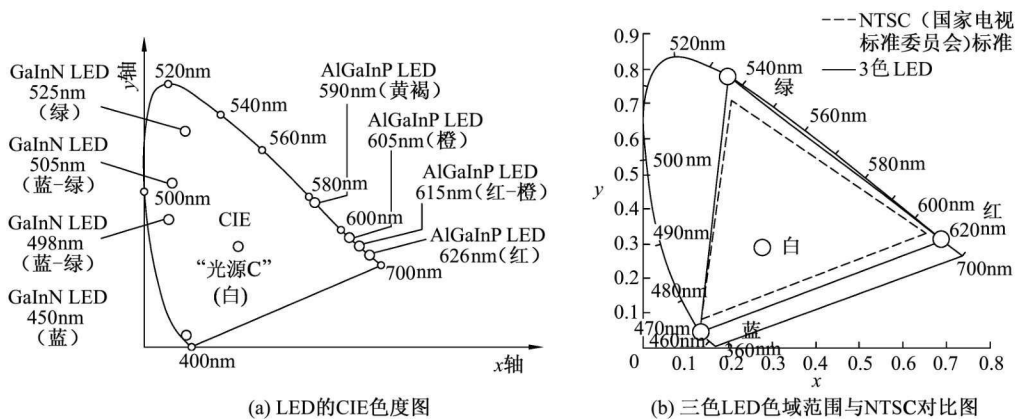


图 1.6 CIE 色度图

## 2. LED 的色温

衡量光源光色的尺度是色温，单位是 K。我们可通过对比光源的光色和理论的黑体辐射体的光色来确定光源的色温。当一个光源的色坐标与黑体在某温度之下的色坐标相近或者相同，此时黑体的温度就被称为该光源的色温。可以用黑体辐射轨迹（普朗克曲线）来确定黑体的温度，如图 1.7 所示。

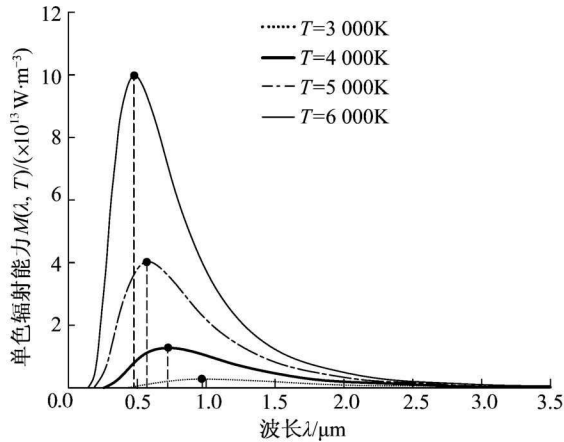


图 1.7 不同温度下黑体的单色辐射出射度（辐射亮度）随波长的变化曲线

色温是评价光源色度特性的一个重要指标，是用来表征光色的，表 1.1 显示了常用光源的色温。相同色温的光源只能够说明具有相同的光色，而它们的光谱可以有极大的差异。色温低的光源在光谱分布中有相对多的红光辐射，通常被称为“暖光”；色温高的光源则会具有相对多的蓝光辐射，通常被称为“冷光”，如图 1.8 所示。

表 1.1 常用光源的色温

光源	色温/K	光源	色温/K
火柴光	1 700	卤钨灯	3 200 左右
蜡烛光	1 850	镝灯	5 500
白炽灯 (100~250W)	2 600~1 900	白炽灯/500W	2 900

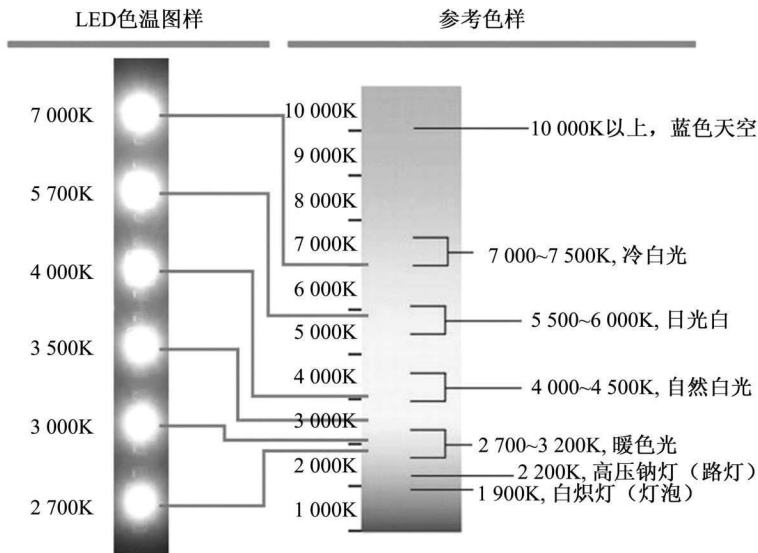


图 1.8 LED 参考色温

## 1.3 LED 性能参数

### 1. LED 伏安特性

LED 是 PN 结二极管的一种，其伏安特性曲线如图 1.9 所示，具有非线性、整流性质和单向导电性，即外加正偏压表现为低接触电阻，反之，表现为高接触电阻。

(1) 正向死区（图中 OA 或 OA' 段）：A 点对应的  $U_0$  为开启电压，当  $U < U_0$ ，外加电场尚不能克服因载流子扩散而形成势垒电场，此时  $R$  很大；开启电压对于不同 LED 其值不同，如 GaAs 为 1V，红色 GaAsP 为 1.2V，GaP 为 1.8V，GaN 为 2.5V。

(2) 正向工作区：电流  $I_F$  与外加电压呈指数关系，即  $I_F = I_S (e^{qU_F/KT} - 1)$ 。其中， $I_S$  为反向饱和电流。当  $U > 0$  时， $U > U_F$  的正向工作区  $I_F$  随  $U_F$  指数上升，其关系式为  $I_F = I_S e^{qU_F/KT}$ 。

(3) 反向死区：当  $U < 0$  时，PN 结加反偏压，外加反向电压不超过一定范围时，通过二极管的电流是少数载流子漂移运动所形成的反向电流。由于反向电流很小，二极管处于截止状态。这个反向电流又称为反向饱和电流或漏电流，二极管的反向饱和电流受温度影响很大。一般硅管的反向饱和电流比锗管小得多，小功率硅管的反向饱和电流在纳安数量级，小功率锗管的反向饱和电流在微安数量级。温度升高时，半导体受热激发，少数载流子数目增加，反向饱和电流也随之增加。

(4) 反向击穿区： $U < -U_R$ ， $U_R$  称为反向击穿电压； $U_R$  电压对应的  $I_R$  为反向漏电流。当反向偏压一直增加，使  $U < -U_R$  时，则  $I_R$  突然增加，二极管出现击穿现象。由于所用化合物材料种类不同，各种 LED 的反向击穿电压  $U_R$  也不同。

### 2. LED 时间响应

响应时间表征某一显示器跟踪外部信息变化的快慢。现有的几种显示器的显示时间为：LCD（液晶显示）约  $10^{-3} \sim 10^{-5}$  s，CRT、PDP、LED 都达到  $10^{-6} \sim 10^{-7}$  s（ $\mu$ s 级）。

从使用角度来看，响应时间就是 LED 点亮与熄灭所延迟的时间，即图 1.10 中的  $t_r$ （接通电源使发光亮度达到正常的 10% 开始，一直到发光亮度达到正常值

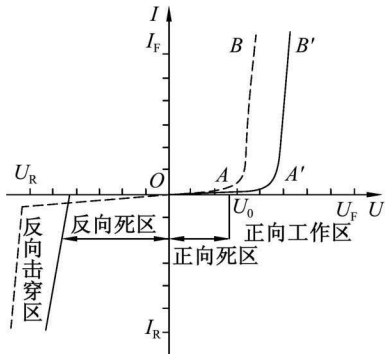


图 1.9 伏安特性曲线

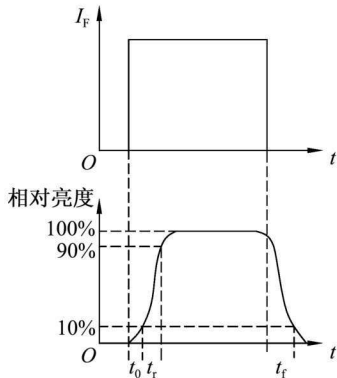


图 1.10 响应时间曲线

的 90% 所经历的时间)、 $t_f$  (正常发光减弱至原来的 10% 所经历的时间)。图中  $t_0$  值很小, 可忽略不计。响应时间主要取决于载流子的寿命、器件的结电容及电路阻抗。

不同材料制得的 LED 响应时间各不相同, 如 GaAs、GaAsP、GaAlAs 其响应时间小于  $10^{-9}$  s, GaP 为  $10^{-7}$  s。因此, 它们可用于 10~100MHz 高频系统。

### 3. LED 的发光亮度与电流的关系

由于 LED 所激发的光子数与向它注入的电子数成正比, 所以 LED 的光辐射能是与流经它的电流成正比的。另一方面, 它产生的热量也是与注入的电流成正比的。更糟的是, 随着热量的增加, LED 的电光转换效率会随之变低。典型的 LED 电光转换曲线如图 1.11 所示, 如果电流过大, 造成的发热量太大, 则该曲线的上部可能会向下弯曲。尽管如此, 大多数情况下, 只要发热不是太严重, 可以近似地认为 LED 的辐射通量与注入的电流成正比。

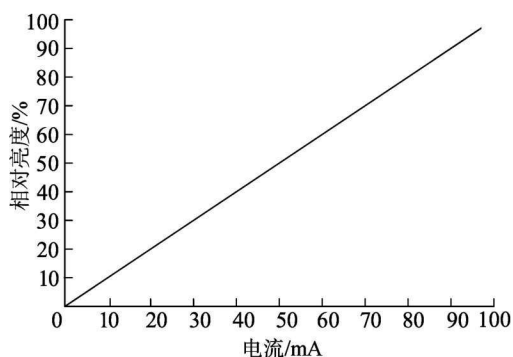


图 1.11 LED 器件的电流-亮度曲线

### 4. LED 光学特性

发光二极管有红外 (非可见) 与可见光两个系列, 前者可用辐射度来量度其光学特性, 后者可用光度学来量度其光学特性。常用辐射度和光度量之间的对应关系详见表 1.2。

表 1.2 常用辐射度和光度量之间的对应关系

辐射度				对应的光度量			
物理量名称	符号	定义式	单位	物理量名称	符号	定义式	单位
辐射能	$Q$		J	光量	$Q_v$	$Q_v = \int \Phi_v dt$	$\text{lm} \cdot \text{s}$
辐射通量	$\Phi$	$\Phi = \frac{dQ}{dt}$	W	光通量	$\Phi_v$	$\Phi_v = \int I_v d\Omega$	lm
辐射出射度	$M$	$M = \frac{d\Phi}{dS}$	$\text{W}/\text{m}^2$	光出射度	$M_v$	$M_v = \frac{d\Phi_v}{dS}$	$\text{lm}/\text{m}^2$
辐射强度	$I$	$I = \frac{d\Phi}{d\Omega}$	$\text{W}/\text{sr}$	发光强度	$I_v$	基本量	cd
辐射亮度	$L$	$L = \frac{dI}{dS \cos\theta}$	$\text{W}/(\text{sr} \cdot \text{m}^2)$	(光) 亮度	$L_v$	$L_v = \frac{dI_v}{dS \cos\theta}$	$\text{cd}/\text{m}^2$
辐射照度	$E$	$E = \frac{d\Phi}{dA}$	$\text{W}/\text{m}^2$	(光) 照度	$E_v$	$E_v = \frac{d\Phi_v}{dA}$	lx

(1) 法向光强及其角分布。

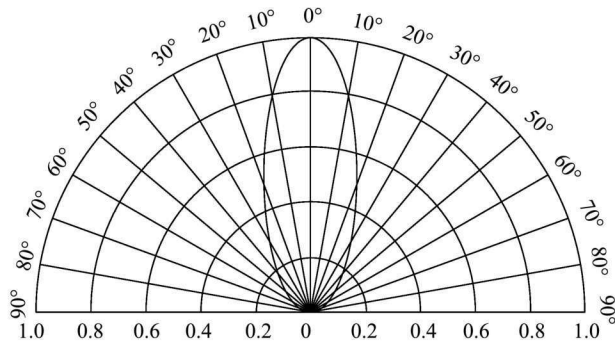
发光强度 (法向光强) 是表征发光器件发光强弱的重要物理量。LED 大量应用于圆柱、圆球封装, 由于凸透镜的作用, 故都具有很强的指向性, 位于法向方向的光强最大, 其与水平面的交角为  $90^\circ$ 。当偏离正法向不同  $\theta$  角度, 光强也随之变化。发

光强度随着封装形状的不同而不同，并且强度依赖角方向，如图 1.12 所示。发光强度的角分布是描述 LED 在空间各个方向上的光强分布。它主要取决于封装的工艺（包括支架、模粒头、环氧树脂中添加散射剂与否）。LED 发光的指向性可以用半角值表示，半角值是指光强等于峰值光强一半时所夹的角。要提高 LED 的指向性，可采取如下措施：使 LED 管芯位置离模粒头远些；使用圆锥状（子弹头）的模粒头；封装的环氧树脂中勿加散射剂。半值角越小，指向性越强。LED 按其半值角大小，可分为以下几种。

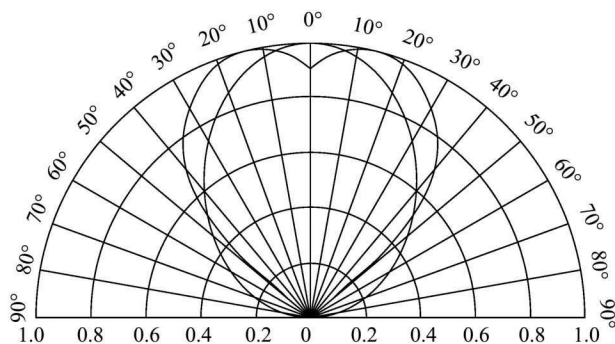
- 高指向性 LED，一般为尖头环氧树脂封装，或带金属反射腔封装，不加散射剂，半角值为  $5^{\circ}\sim 20^{\circ}$  或更小，用在局部照明或自动检测系统中，以便让光线对准所检测物体。

- 标准型 LED，半值角为  $20^{\circ}\sim 45^{\circ}$ ，用作指示灯。

- 散射型 LED，半值角为  $45^{\circ}\sim 90^{\circ}$  或更大，添加的散射剂剂量较大。



(a) 指向性强



(b) 指向性弱

图 1.12 LED 光强在不同空间角度的分布图 (0~1.0 表示相对光强值)

## (2) LED 的光谱特性。

发光光谱是指发光的相对强度（或能量）随波长（或频率）变化的分布曲线。它直接决定着 LED 的发光颜色并影响它的照明效率。发射光谱的形成由材料的种类性质以及发光中心的结构决定，而与器件的几何形状和封装方式无关。LED 发光强度

或光功率输出随着波长的变化而变化，它们之间的关系可绘成一条分布曲线，即光谱分布曲线。当此曲线确定之后，器件的有关主波长、纯度等相关色度学参数亦随之而定。

描述光谱分布的两个主要参量是它的峰值波长和光谱半宽度（简称半宽度）。LED 发出的光并不是单一波长，其波长分布如图 1.13 所示。

LED 波长分布的对称性取决于 LED 所使用的材料种类及结构等因素。尽管不同 LED 的光谱分布曲线位置和形状不同，但都有一个相对发光强度最大处。与相对发光强度峰值对应的波长称为峰值波长（用  $\lambda_p$  表示）。事实上，只有单色光才有峰值波长。

发光强度降为原来的一半，所对应的谱线宽度叫光谱半宽度，也称半功率宽度，用  $\Delta\lambda$  表示。半宽度反映谱线宽窄，即 LED 单色性的参数， $\Delta\lambda$  越小，光谱单色性越好。LED 半宽度小于 40nm。

LED 的光谱分布与制备所用化合物半导体种类、性质及 PN 结结构（外延层厚度、掺杂杂质）等有关，而与器件的几何形状、封装方式无关。图 1.14 绘出几种由不同化合物半导体及掺杂制得的 LED 光谱响应曲线。

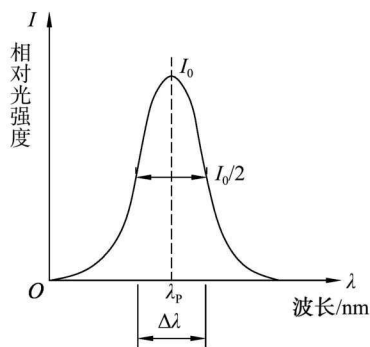


图 1.13 LED 波长分布

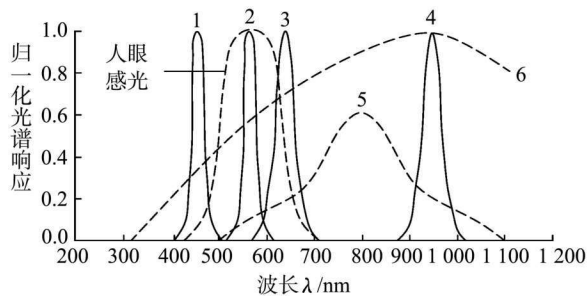


图 1.14 LED 光谱分布曲线

由图 1.14 可见，无论由什么材料制成的 LED，都有一个相对光强最强处（光输出最大），与之相对应有一个峰值波长  $\lambda_p$ 。

1 是蓝色 InGaN/GaN 发光二极管，发光谱峰  $\lambda_p = 460 \sim 465\text{nm}$ ；

2 是绿色 GaP:N 的 LED，发光谱峰  $\lambda_p = 550\text{nm}$ ；

3 是红色 GaP:ZnO 的 LED，发光谱峰  $\lambda_p = 680 \sim 700\text{nm}$ ；

4 是红外 LED（使用 GaAs 材料），发光谱峰  $\lambda_p = 950\text{nm}$ ；

5 是 Si 光电二极管，通常做光电接收用。

6 是红外 LED 使用砷铝化镓 GaAlAs，发光谱峰  $\lambda_p = 950\text{nm}$ 。

### (3) 光通量。

光通量是表征 LED 总光输出的辐射能量，它标志器件的性能优劣。光通量是 LED 向各个方向发光的能量之和，它与工作电流直接有关。随着电流增加，LED 光通量随之增大。可见光 LED 的光通量的国际单位为流明 (lumen, 符号 lm)。

LED 向外辐射的功率，即光通量与芯片材料、封装工艺水平及外加恒流源大小有关。目前单色 LED 的光通量最大约 1lm，白光 LED 的光通量为 1.5~1.8lm (小芯片)，对于用 1mm×1mm 的功率级芯片制成的白光 LED，其光通量为 18lm。

### (4) 发光效率、视觉灵敏度。

LED 效率有内部效率 (PN 结附近由电能转化成光能的效率) 与发光效率 (外量子效率)。内部效率用来分析和评价芯片的优劣。LED 光电特性最重要的发光效率是指辐射出的光能 (发光量) 与输入电能之比。为了提高 LED 的发光效率，主要着眼于提高芯片的出光效率，可采用双反射 (DR) 和分布式布拉格反射 (DBR) 封装结构、倒装芯片技术和表面粗糙化纹理结构等。以采用表面粗糙化纹理结构为例，可以将 InGaAlP LED 的外量子效率提高到普通 InGaAlP LED 芯片的两倍。

流明效率即是发射的光通量 (以流明为单位) 与激发时输入的电功率或被吸收的其他形式能量总功率之比。利用它可评价具有外封装的 LED 特性。LED 的流明效率高是指在同样外加电流下辐射可见光的能量较大，故也叫可见光发光效率。表 1.3 列出常见红光 LED 的流明效率 (可见光发光效率)。

表 1.3 常见红光 LED 的流明效率

波长 $\lambda_p$ /nm	材料	流明效率 / (lm/W)	外量子效率	
			最高值	平均值
700	GaP: ZnO	2.4	12%	1%~3%
660	GaAlAs	0.27	0.5%	0.3%
650	GaAsP	0.38	0.5%	0.2%

视觉灵敏度是使用照明与光度学中一重要参量。人眼感光的波长范围是 380~760nm。人眼的明视觉灵敏度在  $\lambda=555\text{nm}$  处，如图 1.15 中虚线所示。暗视觉灵敏度在  $\lambda=507\text{nm}$  处。

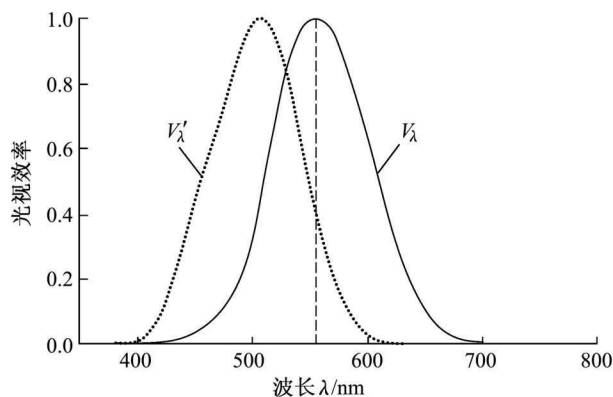


图 1.15 视觉灵敏曲线

(5) 发光亮度  $B_0$ 。

亮度  $B_0$  是 LED 发光性能又一重要参数，具有很强的方向性。某方向上发光体表面亮度等于发光体表面上单位投射面积在单位立体角内所辐射的光通量，单位为  $\text{cd}/\text{m}^2$  或 nit（尼特， $1\text{nit} = 1\text{cd}/\text{m}^2$ ），其正法线方向的亮度  $B_0 = I_0/A$ 。其中  $I_0$  是发光强度， $A$  是单位面积。

若光源表面是理想漫反射面，亮度  $B_0$  与方向无关，为常数。晴朗的蓝天和荧光灯的表面亮度约为  $7\,000\text{Nit}$ （尼特），从地面看太阳表面亮度约为  $1.4 \times 10^9\text{Nit}$ 。

LED 亮度与外加电流密度  $J_0$  有关，一般的 LED 电流密度增加， $B_0$  也近似增大，如图 1.16 所示。另外，亮度还与环境温度有关，环境温度升高，复合效率下降， $B_0$  减小。当环境温度不变，电流增大，足以引起 PN 结温升高，温升后，亮度呈饱和状态。

(6) 寿命。

随着 LED 长时间地工作，其光强或光亮度逐渐衰减。器件老化程度与外加恒流源的大小有关，用公式可描述为

$$B_t = B_0 e^{-t/\tau}$$

式中， $B_t$  为  $t$  时的亮度， $B_0$  为初始亮度。

通常把亮度降到  $B_t = \frac{1}{2} B_0$  所经历的时间  $t$  称为二极管的寿命。测定  $t$  要花很长的时间，通常可用推算方法求得寿命。测量方法为：给 LED 通以一定恒流源，点燃  $10^3 \sim 10^4$  小时后，先后测得  $B_0$ ， $B_t$ （ $B_t$  范围为  $1\,000 \sim 10\,000\text{cd}/\text{m}^2$ ），代入  $B_t = B_0 e^{-t/\tau}$ ，求出  $\tau$ ；再把  $B_t = \frac{1}{2} B_0$  代入，可求出寿命  $t$ 。

## 5. LED 的热学特性

LED 的热学特性直接影响 LED 的工作温度、发光效率、发光波长、使用寿命

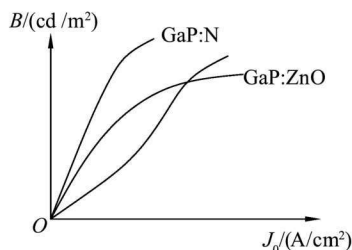


图 1.16 LED 亮度与外加电流密度关系图