

LED 应用技术系列书

LED

景观照明设计与工程应用

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

LED

景观照明设计与工程应用

周志敏 纪爱华 等编著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书结合我国绿色照明工程计划及国内外 LED 景观照明技术发展动态,以 LED 景观照明技术的工程应用设计为核心内容,全面系统地阐述了 LED 景观照明的最新应用技术。全书共 7 章,文中介绍了 LED 基础知识,LED 景观照明,LED 照明灯具结构及设计,道路、桥梁 LED 景观照明工程设计,城市广场及建筑物景观照明设计,园林景观照明工程设计,LED 景观照明工程电气设计等知识,题材新颖实用,内容丰富,深入浅出,文字通俗,具有很高的实用价值。

本书是 LED 应用技术系列书之一,可作为从事 LED 景观照明设计和应用的工程技术人员必备读物,也可供 LED 景观照明灯具生产企业的工程技术人员及高等院校、职业院校相关专业师生阅读参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

LED 景观照明设计与工程应用/周志敏等编著. —北京:中国电力出版社, 2011. 4

(LED 应用技术系列书)

ISBN 978-7-5123-1528-0

I. ①L… II. ①周… III. ①发光二极管-照明-设计
IV. ①TN383

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 050000 号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街 19 号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

北京市同江印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2011 年 8 月第一版 2011 年 8 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 14.5 印张 404 千字

印数 0001—3000 册 定价 29.00 元

敬告读者

本书封面贴有防伪标签,加热后中心图案消失
本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究



Preface 前言

LED是一种可将电能转变为光能的半导体发光器件,属于固态光源。LED优点众多,除了寿命长、耗能低外,控制极为方便,属于典型的绿色照明光源。随着LED技术的不断创新和发展,LED得以在景观照明领域推广应用。LED景观照明灯具体积小、质量轻、方向性好、节能、寿命长,适用于各种恶劣环境条件,LED新光源促使景观照明灯具设计的开发和创新,从很大程度上改变了照明的理念,使LED景观照明灯具将向节能化、健康化、艺术化和人性化方向发展。

LED景观照明技术的发展引起了国内外光源界的普遍关注,LED产品的开发、研制、生产已成为发展前景十分诱人的朝阳产业。随着LED景观照明技术的广泛应用,LED景观照明显示出了强大的发展潜力,并已形成完整的景观照明产业链。

本书将LED景观照明设计基础知识与LED景观照明的工程设计有机地结合起来,系统地讲述了LED基础知识,LED景观照明技术在道路、桥梁、建筑物、广场、园林等领域应用的设计原则、方法及电气工程设计。尽量做到针对性、实用性、科学性相结合,力求做到通俗易懂并结合实际工程应用,以便于读者掌握LED景观照明工程的设计方法和最新应用技术。

参加本书编写的有周志敏、纪爱华、周纪海、纪达奇、刘建秀、顾发娥、刘淑芬、纪达安、纪和平等。本书在编写过程中得到了国内外的专业学者和同行的大力支持,在此表示衷心的感谢。

由于时间短,水平有限,难免有不当之处,敬请读者批评指正。

编著者

Contents 目 录

前言

第1章 LED 基础知识	1
1.1 LED 发光原理及主要参数与特性	1
1.2 LED 固态照明技术	13
第2章 LED 景观照明	22
2.1 城市灯光环境与景观照明	22
2.2 城市景观照明规划设计	27
2.3 LED 景观照明	38
第3章 LED 照明灯具结构及设计	53
3.1 LED 照明技术及灯具结构	53
3.2 LED 灯具设计	77
第4章 道路、桥梁 LED 景观照明工程设计	94
4.1 道路 LED 照明的方案设计	94
4.2 桥梁 LED 景观照明设计	111
第5章 城市广场及建筑物景观照明设计	129
5.1 城市广场景观照明设计	129
5.2 建筑物景观 LED 照明设计	143
第6章 园林景观照明工程设计	162
6.1 园林及照明要素	162
6.2 园林照明设计	173
第7章 LED 景观照明工程电气设计	181
7.1 LED 照明工程配电系统	181
7.2 照明配电线路设计与敷设方式	192
7.3 LED 照明控制系统设计	201
7.4 LED 照明工程的防雷接地设计	207
参考文献	228

第1章

LED 基础知识

1.1

LED 发光原理及主要参数与特性

1.1.1 LED 发光原理及发光效率

1. LED 的结构

LED 是 Light Emitting Diode 的缩写,顾名思义,这是一种会发光的半导体组件,具有二极管的电子特性。LED 属于半导体光电组件,除了具有发光的特性之外,它完全具备半导体二极管整流管的特性。如果取它的整流特性,它不但可以完全符合需求,而且在外加正偏压的情况下,会发出具有某种波长的光。LED 虽然具有整流二极管的功能,但通常是利用 LED 的发光特性而非整流特性,这种发光的特性发生在二极管电子曲线正偏压部分。

50 年前人们已经了解半导体材料可产生光线的基本知识,第一个商用二极管产生于 1960 年。LED 主要由 PN 结芯片、电极和光学系统组成。当在电极上加上正向偏压之后,使电子和空穴分别注入 P 区和 N 区,当非平衡少数载流子与多数载流子复合时,就会以辐射光子的形式将多余的能量转化为光能。

20 世纪 80 年代,LED 主要用于显示器件和短距离、低速率的光纤通信用光源,如各种仪器仪表指示器的文字、数字及其他符号的显示等。由于亮度和颜色等原因,LED 还不能用于通用的照明,而这正是 LED 未来一个非常重要的发展方向。LED 的基本结构是一块电致发光的半导体材料,置于一个有引线的架子上,然后四周用环氧树脂密封,起到保护内部芯线的作用,所以 LED 的抗震性能好。LED 的结构示意图如图 1-1 所示。

LED 的两根引线中较长的一根为正极,应接电源正极。有的 LED 的两根引线一样长,但管壳上有一凸起的小舌,靠近小舌的引线是正极。与白炽灯和氖灯相比,LED 的特点是:工作电压低、工作电流很小、抗冲击和抗震性能好、可靠性高、寿命长、通过调制 LED 的电流强弱可以方便地调制其发光的强弱。

LED 的发光过程包括三部分:正向偏压下的载流子注入、复合辐射和光能传输。微小的半导体芯片被封装在洁净的环氧树脂中,当电子经过该芯片时,带负电的电子移动到带正电的空穴区域并与之复合,电子和空穴消失的同时产生光子。电子和空穴之间的能量(带隙)越大,产生的光子的能量就越高。光子的能量也与光的颜色对应,在可见光的频谱范围内,蓝色光、紫色光携带的能量最多,桔色光、红色光携带的能量最少。由于不同的材料具有不同的带隙,从而能够发出不同颜色的光。

不同的半导体材料中电子和空穴所处的能量状态不同,电子和空穴复合时释放出的能量也不

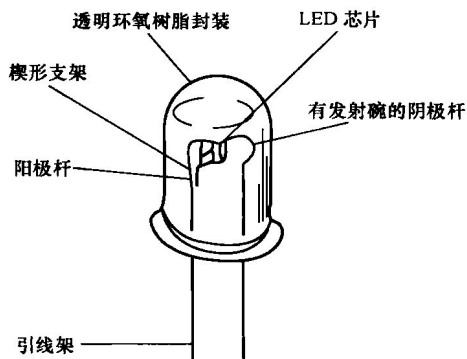


图 1-1 LED 的结构图

同，释放出的能量越多，则发出的光的波长越短。常用的是发红光、绿光或黄光的 LED，如磷砷化镓二极管发红光，磷化镓二极管发绿光，碳化硅二极管发黄光，其材料和主要特性见表 1-1。

表 1-1 红光、绿光或黄光 LED 的材料和主要特性

类 型	发光颜色	最大工作电流 (mA)	一般工作电流 (mA)	正向压降 (V)
磷化镓红色 LED	红	50	10	2.3
磷砷化镓 LED	红	50	10	1.5
碳化硅 LED	黄	50	10	6
磷化镓绿色 LED	绿	50	10	2.3

LED 的正向伏安特性曲线很陡，使用时必须串联限流电阻以控制通过 LED 的电流。在直流电路中，限流电阻 R 可用式 (1-1) 计算，即

$$R = (U - U_F) / I_F \tag{1-1}$$

式中： U 为电源电压； U_F 为 LED 的正向压降； I_F 为 LED 的正向工作电流。

在交流电路中，限流电阻 R 可用式 (1-2) 估算，即

$$R = (U_e - U_F) / 2I_F \tag{1-2}$$

式中： U_e 为交流电源电压的有效值。

2. LED 的发光原理

LED 是由 III-V 族化合物，如 GaAs（砷化镓）、GaP（磷化镓）、GaAsP（磷砷化镓）等半导体制成的，其核心是 PN 结。因此它具有一般 PN 结的 $I-U$ 特性，即正向导通、反向截止、击穿特性。此外，在一定条件下，它还具有发光特性。

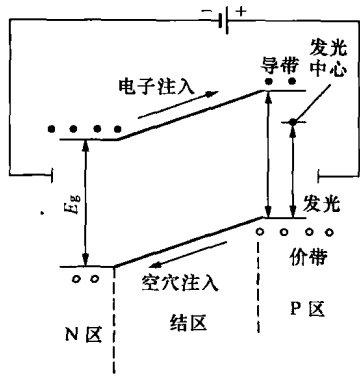


图 1-2 LED 发光原理示意图

PN 结根据其端电压构成一定的势垒，当加正向偏置时势垒下降，P 区和 N 区的多数载流子向对方扩散。由于电子迁移率 μ 比空穴迁移率大得多，出现大量电子向 P 区扩散，构成对 P 区少数载流子的注入。这些电子与价带上的空穴复合，复合时得到的能量以光能的形式释放，这就是 PN 结发光的原理，如图 1-2 所示。

PN 结对电子和空穴具有不同高度的势垒，这两个势垒均很小，但空穴的势垒比电子的势垒小得多，而且空穴不断从 P 区向 N 区扩散，得到高的注入效率。N 区的电子注入 P 区的速率却较小，这样 N 区的电子就跃迁到价带与注入的空穴复合。由于 P 区的能量大，光辐射无法发达到导带，因此不发生光的吸收，从而可直接透射到 LED 外，减少了光能的损失。

假设发光是在 P 区中发生的，那么注入的电子与价带空穴直接复合而发光，或者先被发光中心捕获后，再与空穴复合发光。除了这种发光复合外，还有些电子被非发光中心（这个中心介于导带、价带中间附近）捕获，而后再与空穴复合，每次释放的能量不大，不能形成可见光。发光的复合量相对于非发光复合量的比例越大，光量子效率越高。由于复合是在电子扩散区内发光的，所以光仅在靠近 PN 结面数微米以内产生。理论和实践证明，发光的波长或频率取决于选用的半导体材料的能量 E_g ， E_g 的单位为电子伏 (eV)。

$$E_g = h\nu/q = hc/(\lambda q) \tag{1-3}$$

$$\lambda = hc/(qE_g) = 1240/E_g \tag{1-4}$$

式中： v 为电子运动速度； h 为普朗克常数； q 为载流子所带电荷； c 为光速； λ 为发光的波长，nm。

半导体可分为直接带隙和间接带隙两种，LED 大都采用直接带隙材料，这样可使电子直接从导带跃迁到价带与空穴复合而发光，有很高的效率。反之，采用间接带隙材料，其效率就低一些。若能产生可见光 [波长在 380nm (紫光) ~ 780nm 红光]，半导体材料的 E_g 应在 3.26~1.63eV 之间。LED 的输出光谱决定其发光颜色及光辐射纯度，也反映出半导体材料的特性。表 1-2 列举了常用半导体材料及其发射的光波波长等参数。

表 1-2 常用半导体材料及其发射的光波波长等参数

半导体材料类型	GaAs			GaP		GaAsP	GaAlAs	GaN; Zn
系列	HG400	HG500	HG520			BT	BL	
发光颜色	红外	红外	红外	红	绿	红	红	蓝
发光波长 (nm)	940	930	930	695	555	650	680	490
发光亮度 (cd/m ²)				>0.3	>1	>0.4	>0.4	2
发光功率 (mW)	>1	>10	>100					
正向电压 (V)	<1.3	<1.6	<2	<1.8	<2	<2.5	<2.5	7.5
工作电流 (mA)	30	200	300	10	10	10	10	10
最大工作电流 (mA)	50	200	300	50	50	50	50	
反向电流 (μA)	<50					<50	<50	
反向耐压 (V)	>5					>5	>5	
最大功率 (mW)	75	300				100	100	

LED 正向伏安特性曲线比较陡，在正向导通之前 LED 几乎无电流流过。当电压超过开启电压时，电流就急剧上升。因此，LED 属于电流控制型半导体器件，其发光亮度 L (单位 cd/m²，读作坎德拉每平方米) 与正向电流 I_F 近似成正比，有

$$L = KI_F^m \quad (1-5)$$

式中： K 为比例系数。

在小电流范围内 ($I_F=1\sim10\text{mA}$)， $m=1.3\sim1.5$ 。当 $I_F>10\text{mA}$ 时， $m=1$ ，式 (1-5) 可简化为

$$L = KI_F \quad (1-6)$$

即 LED 亮度与正向电流成正比，LED 的正向电压和正向电流与管芯的半导体材料有关。使用时应根据所要求的显示亮度来选取合适的 I_F 值，既保证亮度适中，也不会损坏 LED。若电流过大，就会烧毁 LED 的 PN 结。

对于 LED 而言，晶格的匹配是一个重大的课题，因为对于大部分 III-V 族半导体而言，并没有刚好适合的基板可承载上方的垒晶 (heteroepitaxy) 层，而成长的垒晶层其晶格大小必须与基板的晶格匹配，才不至于因应力的因素导致晶格缺陷，否则组件发出的光子被晶格缺陷吸收，会大幅降低组件的发光效率。最早的 III-V 族半导体异构垒晶是采用 GaAs 作基板，并在其上成长 GaAlAs 垒晶层，因为这两种材料的晶格非常近似，所以垒晶层与基片之间的应力极小，因此研发过程得以顺利进行。但是后来陆续发展出来的垒晶成长在 GaAs 基板上或是 $\text{GaAs}_x\text{P}_{1-x}$ 成长在 GaP 基板上，都因应力而存在的问题。因此在光电材料中，往往是采用调整二元、三元甚至四元材料的比率的方法，调整不同大小的多元原子的比例来匹配基片的晶格结构，此方法同时也可因为调整半导体的能隙大小，而调整发光组件发光的波长，采用这样的方法在垒晶参数的调整上也复杂许多，因此可以

看出, 垒晶技术可以称为半导体发光组件技术中的核心。

1.1.2 LED 的主要参数与特性

LED 是利用化合物材料制成 PN 结的光电器件, 它具备 PN 结型器件的电学特性 ($I-U$ 特性、 $C-U$ 特性) 和光学特性 (光谱响应特性、发光光强指向特性) 及热学特性。

1. LED 的电学特性

(1) $I-U$ 特性。 $I-U$ 特性是表征 LED 芯片 PN 结性能的主要参数, LED 的 $I-U$ 特性具有非线性、单向导电性, 即外加正偏压表现为低电阻, 反之为高电阻, 如图 1-3 所示。

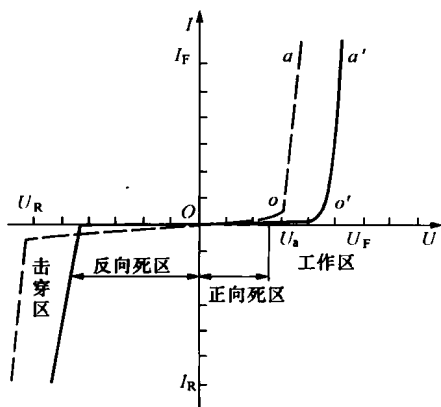


图 1-3 $I-U$ 特性曲线

1) 正向死区 (图 1-3 中的 oa 或 $o'a'$ 段)。 a 点对于 U_a 为开启电压, 当 $U < U_a$, 外加电场尚未克服少数载流子扩散而形成势垒电场, 此时电阻 R 很大。对于不同 LED, 开启电压不同, GaAs 为 1V, 红色 GaAsP 为 1.2V, GaP 为 1.8V, GaN 为 2.5V。

2) 正向工作区。工作电流 I_F 与外加电压呈指数关系, 即

$$I_F = I_S(e^{qU_F/K_T} - 1) \quad (1-7)$$

式中: I_S 为反向饱和电流。

在 $U > U_F$ 的正向工作区, I_F 随 U_F 指数上升, 即

$$I_F = I_S e^{qU_F/K_T} \quad (1-8)$$

正向工作电流 I_F 是指 LED 正常发光时的正向电流值。在实际使用中应根据需要选择 I_F 在 $0.6I_{Fm}$ (I_{Fm} 为

峰值电流) 以下。

正向工作电压 U_F 是在给定正向电流下得到的。一般是在 $I_F = 20\text{mA}$ 时测得的。LED 正向工作电压 U_F 在 1.4~3V。在环境温度升高时, 正向工作电压 U_F 将下降。

在正向电压正小于某一值 (叫阈值) 时, 电流极小, 不发光。当电压超过某一值后, 正向电流随电压迅速增加而使 LED 发光。由 $U-I$ 曲线可以得出 LED 的正向电压、反向电流及反向电压等参数。LED 反向漏电流 $I_R < 10\mu\text{A}$ 。LED 的正向伏安特性如图 1-4 所示。LED 伏安特性模型可用式 (1-9) 表示, 即

$$U_F = U_{st} + R_s I_F + (\Delta U_F / \Delta T)(T - 25) \quad (1-9)$$

式中: U_{st} 为 LED 的启动电压; R_s 为伏安曲线的斜率; T 为环境温度, $^{\circ}\text{C}$; $\Delta U_F / \Delta T$ 为 LED 正向电压的温度系数, 对于多数 LED 而言典型值为 -2V 。

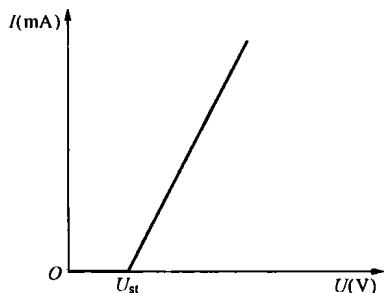


图 1-4 LED 正向伏安特性

从 LED 的 $U-I$ 曲线及模型看, LED 在正向导通后, 其正向电压的细小变动将引起 LED 电流的很大变化, 且环境温度、LED 老化时间等因素也将影响 LED 的电气性能。因 LED 的光输出直接与 LED 电流相关, 所以在 LED 应用中, 应控制驱动电路输入电压、环境温度等因素发生变化, 否则, LED 的光输出将随输入电压和温度等因素的变化而变化, 若 LED 电流失控, LED 长期工作在大电流下将影响 LED 的可靠性和寿命, 甚至造成 LED 失效。

3) 反向死区。 $U < 0$ 时 PN 结加反偏压, GaP LED 的反向漏电流 I_R ($U = -5\text{V}$) 为 0, GaN LED 的反向漏电流 I_R ($U = -5\text{V}$) 为 $10\mu\text{A}$ 。

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, 则出现 I_R 突然增加而出现击穿现象。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) $C-U$ 特性。LED 芯片有 $9\text{mil} \times 9\text{mil}$ ($250\mu\text{m} \times 250\mu\text{m}$)、 $10\text{mil} \times 10\text{mil}$ 、 $11\text{mil} \times 11\text{mil}$ ($280\mu\text{m} \times 280\mu\text{m}$)、 $12\text{mil} \times 12\text{mil}$ ($300\mu\text{m} \times 300\mu\text{m}$) 几种规格, PN 结面积大小不一, 而使 LED 的 $C-U$ 特性呈二次函数关系, 如图 1-5 所示 (图 1-5 所示的 $C-U$ 特性是由 1MHz 交流信号用 $C-U$ 特性测试仪测得)。

(3) 允许功耗 P 。当流过 LED 的电流为 I_F 、管压降为 U_F , 则 LED 的功率消耗为 $P=U_F I_F$ 。LED 工作时, 外加正偏压, 在偏流一定时, PN 结内一部分载流子复合发出光, 还有一部分变为热, 使结温升高。若结温为 T_j 、外部环境温度为 T_a , 则当 $T_j > T_a$ 时, LED 内部热量借助管座向外传热, 散发热量 (功率) 可表示为

$$P = K_T(T_j - T_a) \quad (1-10)$$

(4) 响应时间。LED 的响应时间是标志其反应速度的一个重要参数, 尤其在脉冲驱动或电调制时显得非常重要。响应时间是指输入正向电流后 LED 开始发光 (上升) 和熄灭 (衰减) 的时间。LED 的上升时间随着电流的增大近似呈指数衰减。直接跃迁的材料如 $\text{GaAs}_{1-x}\text{P}_x$ 的响应时间仅几个纳秒, 而间接跃迁材料 GaP 的响应时间则为 100ns。

LED 可利用交流供电或脉冲供电获得调制光或脉冲光, 调制频率可高达几十兆赫兹。采用这种直接调制技术使 LED 在相位测距仪、能见度仪及短距离通信中得到应用。LED 的响应时间从使用角度来看, 就是 LED 点亮与熄灭所延迟的时间, 如图 1-6 中的 t_r 、 t_f 。图 1-6 中的 t_0 值很小, 可忽略。LED 的响应时间主要取决于载流子寿命、器件的结电容及电路阻抗。

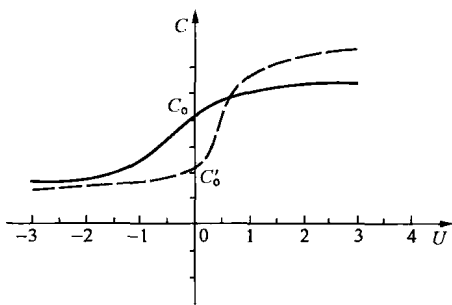


图 1-5 LED $C-U$ 特性曲线

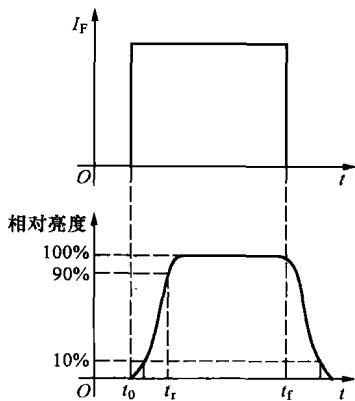


图 1-6 LED 响应时间特性图

1) LED 的点亮时间 t_r (上升时间)。 t_r 是指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的 90% 所经历的时间。

2) LED 熄灭时间 t_f (下降时间)。 t_f 是指正常发光减弱至原来的 10% 所经历的时间。

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

2. LED 的光学特性

LED 有红外 (非可见) 与可见光两个系列, 非可见光系列 LED 可用辐射度来量度其光学特性, 可见光系列 LED 可用光度学 (对可见光的能量计量的学科) 来量度其光学特性。

(1) 发光法向光强及其角分布。LED 发光强度是表征它在某个方向上的发光强弱, 由于 LED 在不同的空间角度光强相差很多, 研究 LED 的光强分布特性, 直接影响 LED 显示装置的最小观察角度。

1) 发光强度(法向光强)是表征发光器件发光强弱的重要性能。LED 采用的是圆柱、圆球形封装,由于凸透镜的作用,故具有很强指向性:位于法向方向光强最大,其与水平面交角为 90° 。当偏离法向角度不同时,光强也随之变化。

2) 发光强度分布。一种在 GaP 基片上生成 GaAsP LED 的发光分布角度如图 1-7 所示,谱线宽度为 $400\text{\AA}$,发射的角度宽度约为 22° ,LED 的辐射通量是集中在一定角度内发射出去的。

3) 光出射度。图 1-8 表明几种半导体 PN 结发射的光出射度与输入电流密度的关系。可见, $\text{GaAs}_{1-x}\text{P}_x$ 和 $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$ LED 具有良好的线性,其他两种则相当差。

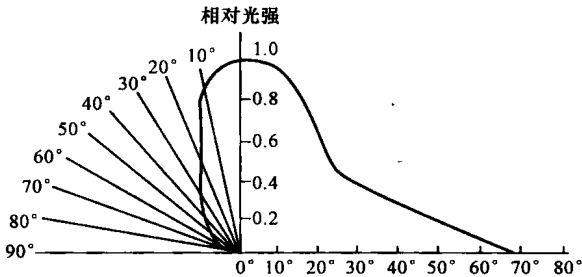


图 1-7 LED 的发光分布角度图

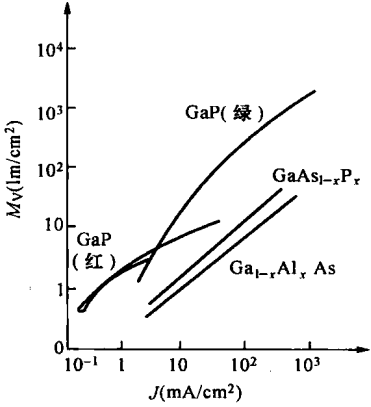


图 1-8 PN 结发射的光出射度 M 与输入电流密度 j 的关系图

4) 发光强度的角分布。发光强度的角分布是描述 LED 发光在空间各个方向上光强分布,它主要取决于封装的工艺(包括支架、模粒头、环氧树脂中是否添加散射剂),为获得如图 1-9 所示的高指向性的角分布,应采取以下措施:①LED 管芯位置应离模粒头远些;②使用圆锥状(子弹头)的模粒头;③封装 LED 的环氧树脂中勿加散射剂。

采取上述措施可使 LED 散射角在 6° 左右,大大提高了指向性。当前几种常用圆形 LED 封装的散射角为 5° 、 10° 、 30° 、 45° 。

(2) 发光峰值波长及其光谱分布。LED 所发的光并非单一波长,其波长基本上如图 1-10 所示分布。由图 1-10 可见,无论什么材料制成的 LED,其光谱分布曲线都有一个相对光强度最强处(光输出最大),与之相对应有一个波长,此波长叫峰值波长,用 λ_0 表示。只有单色光才有 λ_0 波长。

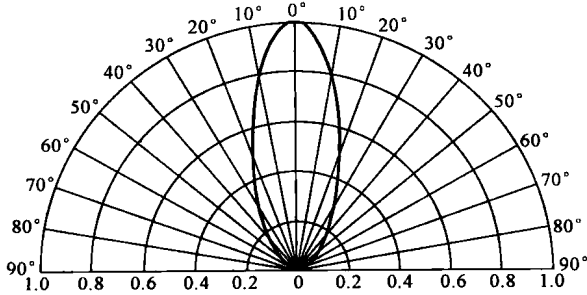


图 1-9 高指向性的角分布图

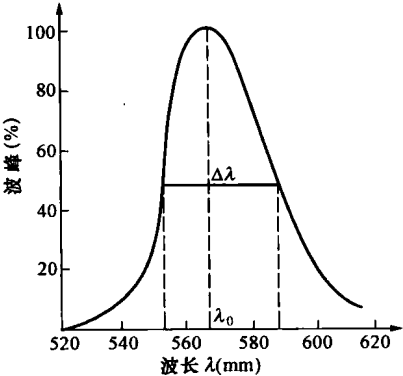


图 1-10 LED 光波长分布图

LED的发光强度通常是指法线（对圆柱形LED是指其轴线）方向上的发光强度，即法向光强。若在该方向上辐射强度为 $1/683 \text{ (W/sr)}$ 时，则发光为 1cd （1坎德拉）。由于一般LED的发光强度小，所以发光强度常用 mcd 毫坎德拉作单位。LED发光强度或光功率输出随着波长变化而不同，绘成一条分布曲线，即为光谱分布曲线。当此曲线确定之后，器件的有关主波长、纯度等相关色度参数亦随之确定。

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1-11绘出几种由不同化合物半导体及掺杂制得LED的光谱响应曲线。

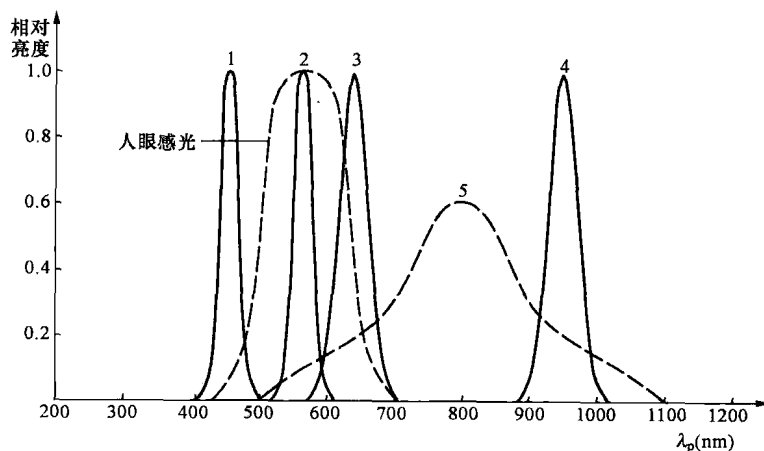


图1-11 不同化合物半导体及掺杂制得LED光谱响应曲线

- 1—蓝色InGaN/GaN LED，发光谱峰 $\lambda_p=460\sim 465\text{nm}$ ；
- 2—绿色GaPN的LED，发光谱峰 $\lambda_p=550\text{nm}$ ；
- 3—红色GaPZnO的LED，发光谱峰 $\lambda_p=680\sim 700\text{nm}$ ；
- 4—使用GaAs材料的LED，发光谱峰 $\lambda_p=910\text{nm}$ ；
- 5—Si光电二极管，通常作光电接收用

对于大多数半导体材料而言，由于折射率较大，在光逸出半导体之前，往往已经过多次反射，由于短波光比长波光易于吸收，所以峰值波长所对应的光子能量比带隙 E_g 小些。例如，GaAs发射的峰值波长所对应的光子能量为 1.1eV ，比室温下的带隙 E_g 小 0.3eV 。改变 $\text{GaAs}_{1-x}\text{P}_x$ 中的 x 值，峰值波长在 $620\sim 680\text{nm}$ 范围内变化。谱线半宽度为 $200\sim 300\text{\AA}$ 。由此可知，LED提供的是半宽度很大的单色光。由于半导体的能隙随温度的上升而减小，因此它所发射的峰波长随温度的上升而增长，温度系数约为 $2\sim 3\text{\AA}/^\circ\text{C}$ 。

在LED谱线的峰值两侧 $\pm\Delta\lambda$ 处，存在两个光强等于峰值（最大光强度）一半的点，此两点分别对应 $\lambda_p-\Delta\lambda$ ， $\lambda_p+\Delta\lambda$ 之间宽度叫谱线宽度，也称半功率宽度或半高宽度。半高宽度反映谱线宽窄，即LED单色性的参数，LED半宽小于 40nm 。光谱半宽度 $2\Delta\lambda$ 表示发光管的光谱纯度，是指图1-12

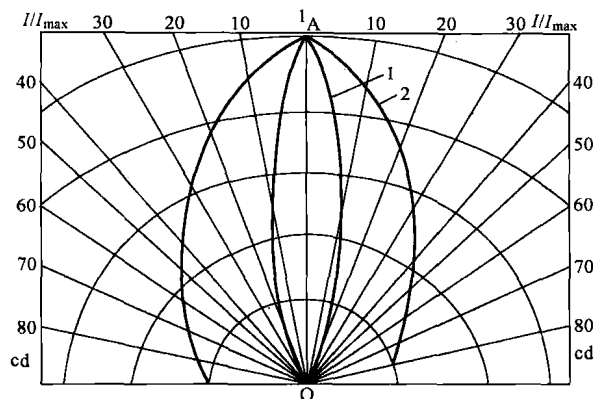


图1-12 两只不同型号LED发光强度角分布
1, 2—两只不同型号LED的发光强度

中 1/2 峰值光强所对应两波长的间隔。

图 1-12 给出两只不同型号 LED 发光强度角分布的情况, 中垂线 (法线) AO 的坐标为相对发光强度 (即发光强度与最大发光强度的之比), 显然, 法线方向上的相对发光强度为 1, 离开法线方向的角度越大, 相对发光强度越小。由图 1-12 可以得到半值角或视角值。半值角 $\theta_1/2$ 是指发光强度值为轴向强度值一半的方向与发光轴向 (法向) 的夹角。半值角的 2 倍为视角 (或称半功率角)。

对于 LED 的光谱特性, 主要看它的单色性是否优良, 而且要注意到红、黄、蓝、绿、白色 LED 等的主要颜色是否纯正。因为在许多场合下, 如交通信号灯对颜色的要求就比较严格, 据观察, 我国现在的一些 LED 信号灯中绿色发蓝, 红色的为深红, 从这个现象来看对 LED 的光谱特性进行专门研究是非常必要而且很有意义的。有的 LED 发光不是单一色, 即不仅有一个峰值波长, 甚至有多峰值, 并非单色光。为此描述 LED 色度特性而引入主波长。主波长就是人眼所能观察到的, 由 LED 发出主要单色光的波长。如 GaP 材料可发出多个峰值波长, 而主波长只有一个, 随着 LED 长期工作、结温升高, 主波长会偏向长波。

(3) 光通量。光通量 Φ 是表征 LED 总光输出的辐射能量, 它标志器件的性能优劣。 Φ 为 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, LED 的光通量单位为流明 (lm)。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 $\Phi \approx 1.5 \sim 1.8 \text{lm}$ (小芯片), 由 $1\text{mm} \times 1\text{mm}$ 的功率级芯片制成的白光 LED, 其 $\Phi = 18 \text{lm}$ 。

(4) 发光效率和视觉灵敏度。

1) LED 效率有内部效率 (PN 结附近由电能转化成光能的效率) 与外部效率 (辐射到外部的效率)。内部效率只是用来分析和评价芯片优劣的特性。LED 最重要的特性是辐射出光能量 (发光量) 与输入电能之比, 即发光效率。

2) 视觉灵敏度。人的视觉灵敏度在 $\lambda = 555 \text{nm}$ 处有一个最大值 680lm/W 。若视觉灵敏度记为 K_λ , 则发光能量 P 与可见光通量 Φ 之间关系为

$$P = \int P_\lambda d\lambda \Phi = \int K_\lambda P_\lambda d\lambda \quad (1-11)$$

3) 发光效率是光通量与电功率之比。发光效率表征了光源的节能特性, 这是衡量现代光源性能的一个重要指标。LED 的量子效率为

$$\eta = \text{发射的光子数} / \text{PN 结载流子数} = (e/hcI) \int \lambda P_\lambda d\lambda \quad (1-12)$$

若输入能量为 $W = UI$, 则发光能量效率为

$$\eta_P = P/W \quad (1-13)$$

若光子能量 $h_c = eV$, 则

$$\eta \approx \eta_P \quad (1-14)$$

则总光通为

$$\Phi = (F/P)P = K\eta_P W \quad (1-15)$$

式中

$$K = \Phi/P$$

LED 的效率可以用电光源的常用术语来表征, 即对红外光采用辐射效率 η_e , 对可见光则用发光效率 η_l , 但是也有用内量子效率 η_{qi} 和外量子效率 η_{qe} 来表征的。内量子效率 η_{qi} 为

$$\eta_{qi} = NT/G \quad (1-16)$$

式中: NT 为辐射复合产生光子的效率; G 为注入的电子空穴对数。

这样 η_{qi} 等于注入每个电子空穴对在半导体内所发生的光子数, 最高可接近 100%。外量子效率

η_{qe} 为

$$\eta_{qe} = NT/G \quad (1-17)$$

式中: NT 为从 LED 输出光子的效率。

这样 η_{qi} 等于注入每个电子空穴对所产生的输出器件外的有效光子数, 一般只有 0.01%~13%。发射红外的 η_{qe} 可达 15%, 而绿光 η_{qe} 则下降到 1% 以下。

使外量子效率显著下降的主要原因是半导体本身的吸收, 是光从半导体射入空气时的反射损失和全反射损失造成的。例如 GaAs 的折射率 $n=3.6$, 反射损失为 32%, 用图 1-13 (a) 所示结构的全反射损失为 96%, 出射的光只有百分之几。采用图 1-13 (b) 的结构, 全反射损失大为减少。图 1-13 (b) 的球形部分常用材料为透明树脂, 以降低成本。

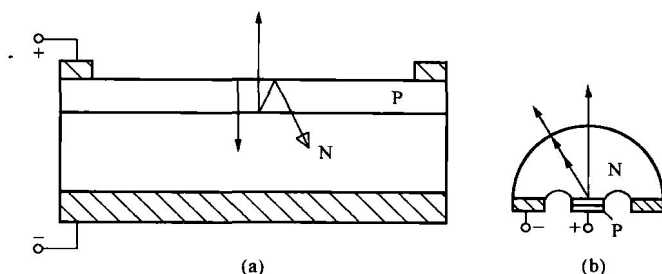


图 1-13 LED 结构示意图
(a) LED 结构示意; (b) 球形部分结构

4) 流明效率是评价具有外封装 LED 特性的主要参数, LED 的流明效率高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 列出几种常见 LED 流明效率 (可见光发光效率)。

表 1-3 几种常见 LED 流明效率 (可见光发光效率)

LED 发光颜色	λ_p (nm)	材 料	可见光发光效率 (lm/W)	外量子效率	
				最高值	平均值
红光	700	GaP; ZnO	2.4	12	1~3
	660	GaAlAs	0.27	0.5	0.3
	650	GaAsP	0.38	0.5	0.2
黄光	590	GaP; N-N	0.45	0.1	
绿光	555	GaP; N	4.2	0.7	0.015~0.15
蓝光	465	GaN		10	
白光	谱带	GaN+YAG	小芯片 1.6, 大芯片 18		

品质优良的 LED 要求向外辐射的光能量大, 向外发出的光尽可能多, 即外部效率要高。事实上, LED 向外发光仅是内部发光的一部分, 总的发光效率应为

$$\eta = \eta_i \eta_c \eta_e \quad (1-18)$$

式中: η_i 为向 PN 结区少子注入效率; η_c 为在势垒区少子与多子复合效率; η_e 为外部出光 (光取出效率) 效率。

由于 LED 材料折射率很高 $n \approx 3.6$ 。当芯片发出光垂直入射晶体材料与空气界面时 (无环氧封装), 被空气反射, 其反射率为

$$(n-1)^2/(n+1)^2 = 0.32$$

反射出的光仅占 32%，鉴于晶体本身对光有相当一部分的吸收，于是大大降低了外部出光效率。为了进一步提高外部出光效率 η_e 可采取以下措施：用折射率较高的透明材料（环氧树脂 $n=1.55$ 并不理想）覆盖在芯片表面；把芯片晶体表面加工成半球形；用 E_g 大的半导体材料作衬底以减少晶体内部光吸收。若用 $n=2.4\sim 2.6$ 的低熔点、热塑性大的玻璃作封帽，可使红外 GaAs、GaAsP、GaAlAs 的 LED 发光效率提高 4~6 倍。

(5) 发光亮度。发光亮度是 LED 发光性能又一重要参数，具有很强方向性。指定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，亮度的单位为 cd/m^2 或 Nit。其正法线方向的亮度为

$$B_0 = I_0/A \quad (1-19)$$

式中： B_0 为发光亮度； I_0 为漫射面在法线方向的辐射强度或发光强度； A 为被照面的面积。

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 7000Nit（尼特），从地面看太阳表面亮度约为 $14 \times 10^8 \text{Nit}$ 。LED 亮度与外加电流密度有关，一般的 LED， J_0 （电流密度）增加 B_0 也近似增大。另外，亮度还与环境温度有关，环境温度升高， η_e （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。

在 1970~1995 年间，一直在探索更高级别亮度的 LED。但是，自从 20 世纪 90 年代中期，伴随着蓝光和白光 LED 的出现以及器件平均发光亮度的成倍增加，LED 创新的步伐才大大加快。LED 亮度的提高主要归功于基底材料的发展，从最初的磷砷化镓（GaAsP）产品开始，在 20 世纪 70 年代末转向掺杂氮的 GaAsP 和磷化镓（GaP），实现了最早的黄光和绿光 LED；随后利用单双异质砷铝化镓（GaAlAs）在 20 世纪 90 年代初实现了超过 0.1lm 的光通量。自 20 世纪 90 年代以来，各种砷镓组合成为更新颖、更明亮的彩色（包括蓝色）LED 的基底材料。尽管 LED 经历了上述发展，但仍然存在几个问题，其中一个现象就是基底往往会吸收 LED 产生的大部分光线。围绕这一问题有几种解决方法，Lumileds 公司利用获得专利的透明铝镓磷化镓（AlInGaP）基底来解决这个难题。另一种方法是在基底上添加 Bragg 反射器光栅层，这样做所提供的 LED 亮度是一般吸光基底所能提供的两倍，但是会损失所有以 90° 角发射的光线。Vishay 公司利用一种有机镜面附着（OMA）技术对此方法进行了改进，该技术将一个镜面附着在硅基底上，所有到达镜面的光线从器件的正面反射，因而可以达到与利用透明基底相同的光亮级别，大约是标准 LED 的四倍。

(6) 寿命。LED 的寿命一般很长，在电流密度 J_0 小于 $1\text{A}/\text{cm}^2$ 的情况下，寿命可达 1 000 000h，即可连续点燃 100 多年。这是任何光源均无法与之相提并论的。LED 的亮度随着工作时间的加长而衰退，这就是老化。老化的快慢与电流密度 J_0 和老化时间常数 τ 有关。

LED 发光亮度随着工作时间增长而出现光强或光亮度衰减现象称为老化，器件老化程度与外加恒流源的大小有关，可描述为

$$B_t = B_0 e^{-t/\tau} \quad (1-20)$$

式中： B_t 为 t 时间后的亮度； B_0 为初始亮度。

通常把亮度降到 $B_t=1/2B_0$ 所经历的时间 t 称为 LED 的寿命。测定 t 要花很长的时间，通常以推算求得寿命。测量方法是用一定的恒流源驱动 LED，先测得 B_0 ，点燃 $10^3\sim 10^4\text{h}$ 后，再测得 $B_t=1000\sim 10\,000$ ，代入 $B_t=B_0 e^{-t/\tau}$ 求出 τ ；再把 $B_t=1/2B_0$ 代入，可求出寿命 t 。

长期以来总认为 LED 寿命为 10^6h ，这是指单个 LED 在 $I_F=20\text{mA}$ 下。随着功率型 LED 开发应用，国外学者认为以 LED 的光衰减百分比数值作为其寿命的依据。如 LED 的光衰减为原来

35%，寿命>6000h。

3. LED 的热学特性

LED 的光学参数与 PN 结结温有很大的关系。一般工作在小电流 $I_F < 10\text{mA}$ ，或者 $10 \sim 20\text{mA}$ 长时间连续点亮 LED 时，LED 的温升不明显。若环境温度较高，LED 的主波长或 λ_p 就会向长波漂移， B_0 也会下降，尤其是点阵、大显示屏的温升对 LED 的可靠性、稳定性的影响较明显。LED 的主波长随温度变化的关系可表示为

$$\lambda_p(T') = \lambda_0(T_0) + \Delta T_g \times 0.1\text{nm}/^\circ\text{C} \quad (1-21)$$

由式 (1-21) 可知，每当结温升高 10°C ，则波长向长波漂移 1nm ，且发光的均匀性、一致性变差。这就要求作为照明用的灯具光源小型化、密集排列以提高单位面积上的光强、光亮度，尤其应注意用散热好的灯具外壳或专门通风设备，确保 LED 长期稳定工作。

4. LED 的产品形式

1968 年 HP 公司就生产出发红光的 LED（波长 660nm ），而后陆续出现了可用于显示屏的黄绿光（波长 570nm ）、蓝光（波长 470nm ）及纯绿色光（波长 525nm ）的 LED，应用于显示屏的 LED 发光材料有以下几种形式。

(1) 单体 LED。一般由单个 LED 晶片、反光碗、金属阳极、金属阴极构成，外包具有透光聚光能力的环氧树脂外壳。可用一个或多个（不同颜色的）单灯构成一个基本像素，由于亮度高，多用于户外显示屏。

(2) LED 点阵模块。由若干晶片构成发光矩阵，用环氧树脂封装于塑料壳内。适合行列扫描驱动，容易构成高密度的显示屏，多用于户内显示屏。

(3) 贴片式 LED 发光灯（或称 SMD LED）。LED 采用贴焊形式的封装，可用于户内全彩色显示屏，可实现单点维护，能有效克服马赛克现象。

5. LED 的发光质量

LED 发光质量主要表现在以下三个方面。

(1) LED 的发光亮度。影响 LED 发光亮度的主要因素是 LED 的芯片。

(2) LED 的寿命。影响 LED 的寿命的主要原因有：静电、焊点、散热，这些因素与金线和灯杯有直接关系。

(3) LED 的一致性。LED 产品的一致性有：角度（主要是偏角和角度大小不一致）的一致性；亮度（这跟用的芯片品质和灯杯的好坏有关）的一致性，这与生产工艺设备和操作人员技术水平有关。

近年来各大公司和研究机构对 LED 的研究方兴未艾，使其光效得以大大提高，飞利浦与 Agilent 的合资公司目前已研发并生产出光效达到 $171\text{lm}/\text{W}$ 的白色 LED，已达到白炽灯的水平。和白炽灯相比较，LED 在性能上具有很多优点，见表 1-4。

表 1-4 白炽灯与白色 LED 的性能比较

参 数	LED	白 炽 灯
色温 (K)	3000~10 000	2500~3000
光效 (lm/W)	15	15
反应速度 (μs)	0.1	100 000
冲击电流	0	10 倍额定电流
耐压击性	很强	易断裂
寿命 (h)	>20 000	<1000

6. LED 的极限参数

LED 的极限参数有以下几项。

(1) 允许功耗 P_m ，即允许加于 LED 两端正向直流电压与流过它的电流之积的最大值。超过此值，LED 会发热、甚至损坏。

(2) 最大正向直流电流 I_{Fm} ，即允许通过 LED 的正向直流电流的极限值；超过此值可损坏 LED。

(3) 最大反向电压 U_{Rm} ，即 LED 所允许加的最大反向电压；超过此值，LED 可能被击穿损坏。

(4) 工作环境温度 t_{opm} ，即 LED 可正常工作的工作环境范围。低于或高于此温度范围，LED 将不能正常工作，效率大大降低。

7. LED 光源的特点

LED 是能将电信号转换成光信号的结型电致发光半导体器件，其主要特点介绍如下。

(1) LED 使用低压电源，供电电压在 6~24V 之间，根据产品不同而异。在低电压 (1.5~2.5V)、小电流 (5~30mA) 的条件下工作，即可获得足够高的亮度。LED 具有和普通二极管相似的单向导电特性，只是死区电压略高些，具有和硅稳压二极管相似的稳压特性。目前常用的 LED 有发红光和绿光的磷化镓 (GaP) LED，其正向压降 $U_F = 2.3V$ ；发红光的磷砷化镓 (GaAsP) LED，其正向压降 $U_F = 1.5 \sim 1.7V$ ；以及采用碳化硅和蓝宝石材料的黄光、蓝光 LED，其正向压降 $U_F = 6V$ 。

(2) LED 所消耗能量较同光效的白炽灯减少 80%；发光响应速度快 ($10^{-7} \sim 10^{-9}s$)，高频特性好，能显示脉冲信息。

(3) 单色性好，发光颜色光艳夺目、美观大方、颜色多样；常见颜色有红、绿、黄、橙等。改变电流可以变颜色，LED 可方便地通过化学修饰方法，调整材料的能带结构和带隙，实现红、黄、绿、蓝、橙多色发光。如小电流时为红色的 LED，随着电流的增加，可以依次变为橙色、黄色，最后为绿色。

(4) 体积小。发光面形状分圆形、长方形、异形 (三角形等)。其中圆形 LED 的外径有 $\phi 1$ 、 $\phi 2$ 、 $\phi 3$ 、 $\phi 4$ 、 $\phi 5$ 、 $\phi 8$ 、 $\phi 10$ 、 $\phi 12$ 、 $\phi 15$ 、 $\phi 20mm$ 等规格，直径 1mm 的属于超微型 LED。每个单元 LED 小片是 3~5mm 的正方形，所以可以制备成各种形状的器件，并且适合于易变的环境。

(5) 防震动及抗冲击穿性能好，功耗低，发热量少、耗电量小，寿命长。由于 LED 的 PN 结工作在正向导通状态，本身功耗低，只要加必要的限流措施，即可长期使用，寿命在 10 万 h 以上，甚至可达 100 万 h。

(6) 使用灵活，根据需要可制成数码管、字符管、电平显示器、点阵显示器、固体发光板、LED 平极型电视屏等。

(7) 容易与数字集成电路匹配。

(8) 对环境无污染：无有害金属汞。

8. LED 的分类

(1) 按 LED 发光颜色可分成红色、橙色、绿色 (又细分黄绿、标准绿和纯绿)、蓝色、白色等。另外，有的 LED 中包含二种或三种颜色的芯片。根据 LED 出光处掺或不掺散射剂、有色还是无色，还可分成有色透明、无色透明、有色散射和无色散射四种类型，散射型 LED 适用于做指示灯。

(2) 按 LED 出光面特征分圆灯、方灯、矩形、面发光管、侧向管、表面安装用微型管等。圆形灯按直径分为 $\phi 2$ 、 $\phi 4.4$ 、 $\phi 5$ 、 $\phi 8$ 、 $\phi 10mm$ 及 $\phi 20mm$ 等。国外通常把 $\phi 3mm$ 的 LED 记作 T-1；把 $\phi 5mm$ 的记作 T-1 (3/4)；把 $\phi 4.4mm$ 的记作 T-1 (1/4)。